

# Nanosciences : nouvel âge d'or ou apocalypse ?

une réflexion de Louis Laurent et Jean-Claude Petit du Département de recherche sur l'état condensé, les atomes et les molécules (Drecam).

**A propos des auteurs** : Louis LAURENT est le chef du Département de recherche sur l'état condensé, les atomes et les molécules (Drecam) au CEA. Jean-Claude PETIT est le chef du Service de chimie moléculaire de ce même département, et est l'auteur d'articles variés sur la sociologie des sciences.

**A propos du Département de recherche sur l'état condensé, les atomes et les molécules** : le Drecam et le Département de recherche fondamentale sur la matière condensée (DRFMC) sont les deux départements de la Direction des sciences de la matière du CEA qui interviennent dans le domaine des nanosciences. Ils regroupent environ 200 chercheurs, physiciens, chimistes, biologistes et ingénieurs travaillant sur ce sujet, la plupart du temps dans des laboratoires communs avec le CNRS ou l'université dans le cadre d'un programme national sur les nanosciences. Ces programmes sont en amont de ceux de la Direction de la recherche technologique du CEA. Les grandes thématiques de ces recherches sont :

- propriétés des électrons dans les nanoobjets : effets quantiques, magnétisme, optique à un photon, propriétés électriques des molécules
- nanoobjets, architectures supramoléculaires et nanomatériaux
- interfaces avec la biologie en vue notamment d'application aux diagnostics,

## Introduction

La fin du vingtième siècle a été marquée par une évolution scientifique et technologique majeure dont nous commençons seulement à entrevoir les conséquences incalculables. En effet, la compréhension à l'échelle atomique des propriétés de la matière, les progrès considérables obtenus grâce à l'approche moléculaire du fonctionnement du vivant et, simultanément, l'essor du traitement de l'information ont conduit à une unification croissante des sciences de l'état condensé (physique, chimie, biologie), à l'échelle du nanomètre, pour former ce qu'on appelle désormais les nanosciences. Ce mouvement est souvent daté de la fin de 1959, date du discours fondateur de Richard Feynman « There is plenty of room at the bottom » à la réunion annuelle de l'American Physical Society au Caltech (USA) (réf. Feynman, 1959). Plus que l'émergence d'une véritable discipline nouvelle on peut considérer les nanosciences comme le résultat de la convergence de différentes disciplines au niveau (supra)moléculaire voire une façon de revisiter des questions anciennes. On peut imaginer une synergie ultérieure de ces disciplines avec la science de la complexité, étape manquante pour passer de l'objet nanométrique bien maîtrisé à des systèmes beaucoup plus « riches » à l'image de ce que fait la nature avec les cellules ou le cerveau. Par ailleurs, tiré par de nouvelles applications toujours plus nombreuses, le monde de la technologie subit une évolution similaire. **Dans les années 1990, on prend conscience du potentiel des applications croisées entre la microélectronique, la biologie et les technologies de l'information.** Parmi les exemples particulièrement emblématiques, citons les objets communicants, les biopuces et les systèmes mécaniques miniatures.

Le rapprochement de cet ensemble de disciplines est parfois appelé par les anglo-saxons la convergence NBIC (Nanosciences, Biologie, Informatique et sciences de la Cognition). Cette évolution (que certains qualifient de révolution) laisse augurer d'innovations importantes dont certaines ont une portée telle qu'elles pourraient modifier profondément notre mode de vie. Tous les domaines sont concernés et des investissements gigantesques (en milliards d'euros) sont consentis tant aux USA qu'en Europe ou au Japon. A court terme, les secteurs suivants sont concernés :

- Société de la connaissance : on vise l'amélioration des systèmes de traitement de l'information (calcul, stockage) en particulier pour extrapoler la série relais - tube à vide - transistor - circuit intégré qui a déjà permis d'accroître de onze ordres de grandeur les puissances de calcul à coût constant. Cette évolution s'accompagne de l'essor des communications et de la dispersion des calculateurs, des capteurs et des actionneurs.
- Médecine : ces développements laissent entrevoir la possibilité de diagnostiquer et soigner en agissant à l'échelle nanométrique au moyen de capteurs, de systèmes de visualisation, de principes actifs vectorisés, de tissus synthétiques, etc.

Développement durable et secteur de l'énergie : on peut imaginer la multiplication de procédés « doux » pour l'environnement (à l'image de la chimie du vivant), la création de matériaux recyclables ou capables de

« disparaître » dans l'environnement sans générer de pollution, des moyens de séquestrer le dioxyde de carbone. De même la nanostructuration permettrait d'augmenter les rendements de nombreux dispositifs, voire d'exploiter les énergies renouvelables avec une meilleure efficacité, en particulier le solaire.

Les items ci-dessus correspondent à des recherches en cours voire à des produits existants. Il existe également une littérature, extrapolant les progrès des nanosciences à long terme, avec par exemple les ouvrages de Ray Kurzweil, Hans Moravec et Eric Drexler. Ces ouvrages doivent plus être considérés comme des éléments pour une réflexion sur le long terme que comme des prédictions à prendre au pied de la lettre. Ils s'appuient sur des bases scientifiques certaines (leurs auteurs ont travaillé dans les domaines qu'ils développent) mais restent pour l'instant du domaine de la fiction. **On y imagine une société dans laquelle la maîtrise de la fabrication à l'échelle atomique permettrait de réaliser les idées les plus folles :**

L'une d'entre elles serait l'augmentation des capacités de calcul permettant de réaliser des systèmes plus performants que le cerveau humain en vue de réaliser des machines autonomes éventuellement « conscientes » (ce mot restant à préciser), de s'interfacer avec le cerveau (en vue d'une extension de ses capacités, ou de brancher nos sens sur une réalité virtuelle) (réf. Moravec, 1999 et Kurzweil, 1999).

- De même, de nouvelles technologies permettraient de réparer les dysfonctionnements du corps humain, d'agir profondément sur nos sens et sur le fonctionnement du cerveau, de réaliser des machines intelligentes.
- Une autre idée serait la possibilité de manipuler la matière à l'échelle moléculaire en vue de réaliser des dispositifs optimisés dont on pourrait récupérer tous les éléments atome par atome après usage. L'humanité tendrait alors à ne se nourrir que d'énergie et à recycler indéfiniment ses ressources. Le document fondateur de ce type de représentations, est le livre souvent cité de Eric Drexler, « Engines of creation », publié en 1986 (réf. Drexler, 1986). L'auteur y disserte en particulier longuement sur les « assembleurs » nanomachines capables de fabriquer des produits optimaux voire de se construire eux-mêmes. Des machines mimant le vivant....

Cependant, la situation est résolument paradoxale : les promesses des nanosciences sont à peine formulées, dans tous les domaines où l'on en attend de formidables avancées (voir ci-dessus) que déjà de terrifiants périls nous attendraient dans un avenir aussi proche qu'apocalyptique. Bien plus, des acteurs qui en sont les pionniers, tels Eric Drexler et Bill Joy (réf. Joy, 2000) , ont eux-mêmes réveillé ces peurs alors que personne, et surtout pas le public qui ignorait tout des nanosciences, ne s'en était encore préoccupé. Voici que l'Apprenti sorcier se fait lui-même Cassandre...

Ainsi, **les nanosciences et les nanotechnologies sont en débat avant même d'avoir pris une existence réelle.** On exige d'elles quelles démontrent leurs véritables avantages (où est le Progrès ? et pour qui ?) alors que l'on pointe déjà leurs inconvénients supposés qui

apparaissent comme porteurs de véritables catastrophes. Depuis quelques décennies, les peurs associées au développement des sciences et des technologies se sont multipliées : nucléaire, clonage, informatique, OGM, etc. (voir par exemple Farouki, 2001) dans un contexte de remise en cause progressive, et semble-t-il irréversible, de la notion classique de Progrès. Cependant, la question que posent les nanosciences et les nanotechnologies n'est peut-être pas un problème de plus, parmi d'autres, que les spécialistes et les décideurs ont à traiter dans le cadre d'une nouvelle gouvernance, pour continuer à avancer, malgré les réticences (supposées, réelles ou en émergence) de la société. Selon Dupuy (réf. Dupuy, 2004), les nanosciences et les nanotechnologies sont «le» problème majeur dans la mesure où elles pourraient conduire à un monde artificiel qui échapperait définitivement au contrôle de l'Humanité. Selon cet auteur, ce n'est pas telle ou telle caractéristique technique des nanoobjets qui pourrait éventuellement, en cas de «dérapiage», poser problème, c'est la philosophie sous-jacente à l'ensemble de ce projet qui conduirait inéluctablement à la catastrophe. En effet, le déploiement des nanosciences et des nanotechnologies implique, au moins potentiellement, une capacité d'auto-organisation et d'autocréation de structures complexes par les nanoobjets eux-mêmes. A terme, celles-ci pourraient ne plus rien devoir à l'Homme ni même à la Nature. Ce monde artificiel qui, selon l'expression fameuse de Bill Joy "n'aura plus besoin de nous" (ref. Joy 2000), nierait le principe fondateur de la science moderne selon lequel l'Homme connaît, et donc maîtrise, ce qu'il est capable de faire et de refaire (d'où l'importance de l'expérimentation et de la modélisation dans toute démarche scientifique). Dès lors, comment éviter, s'interroge Dupuy, une catastrophe qui semble inéluctable ? (réf. Dupuy, 2002) Pour cet auteur, la raison reste l'ultime arme contre un pessimisme radical, la faculté que nous avons d'imaginer un avenir à la fois catastrophique et crédible doit nous permettre de prendre les mesures qui feront en sorte que l'inéluctable n'advienne jamais (si le scénario n'était pas crédible, on ne ferait évidemment rien) !

**Le contraste entre la débauche de merveilles technologiques promises pour un avenir relativement proche** (le bonheur est pour demain, il suffit d'investir quelques milliards d'euros...) **et les catastrophes irréversibles annoncées** (cette fois-ci, c'est vraiment la fin du monde !) **doit nous conduire à réfléchir : quels sont les enjeux associés aux nanosciences et aux nanotechnologies, les risques d'ores et déjà identifiés et les mesures qu'il conviendrait de prendre pour y parer, le cas échéant ?**

Dans un domaine qui se caractérise par un foisonnement exceptionnel tant de résultats scientifiques et techniques que de prises de positions dans le débat, provenant d'horizons très divers, le présent article a une ambition limitée. Nous souhaitons essentiellement clarifier les éléments constitutifs de la controverse pour aider à la réflexion de la communauté scientifique et technique et, au-delà, de tous ceux que cette question commence à préoccuper. Nous faisons le pari que la connaissance du dossier, hors de toute polémique, permettra d'aborder le problème d'une manière plus sereine et de trouver les mesures à prendre qui conviennent, si nécessaire et autant qu'il est raisonnablement possible.

On peut considérer que ces questions s'insèrent dans une problématique beaucoup plus vaste liée à la notion de Progrès, point qui sera évoqué en première partie. Progrès, sous les auspices duquel se placent toujours les chercheurs, les ingénieurs et les industriels porteurs des innovations technologiques. Progrès que contestent précisément d'autres acteurs qui, tout aussi sincères, tentent de nous avertir des possibles effets négatifs des nanosciences et des nanotechnologies.

Nous retracerons ensuite brièvement la naissance des nanosciences et leurs promesses avant de décrire les différentes questions qu'elles soulèvent qui sont la source des inquiétudes voire des peurs que commencent à exprimer certains citoyens, y compris au sein de la communauté scientifique et technique elle-même.

Nous proposerons une typologie de ces peurs fondée sur trois grands thèmes fondamentaux autour desquels elles nous semblent se structurer. Nous montrerons que ces thèmes, qui sont généralement associés à toutes les peurs de la science et des technologies, s'enracinent profondément dans la tradition judéo-chrétienne. Ce constat nous suggère, d'une part, que des réponses variées doivent être proposées pour aborder des questions qui sont en fait de natures différentes et, d'autre part, qu'il serait vain d'aborder ces problèmes sous un angle strictement, et uniquement, scientifique.

Enfin, nous tracerons brièvement des pistes de réflexion pour tenter de dégager des solutions pratiques visant à un meilleur traitement de ces questions.

## **1. Progrès en procès**

Le progrès scientifique et technique est classiquement considéré comme un facteur d'amélioration de notre qualité de vie en particulier lorsqu'il conduit au développement de nouveaux produits et services répondant à une attente de la société. C'est notamment le cas dans le domaine médical ou pour la protection de l'environnement. **D'une manière plus générale, on s'accorde à penser le progrès scientifique et technique comme l'un des facteurs majeurs du développement et de la compétitivité, des économies modernes.** Ce rôle ne peut que s'amplifier à l'avenir avec l'avènement d'une économie fondée sur la connaissance dans laquelle la capacité d'innovation deviendrait un élément stratégique pour les firmes comme pour les Etats. **Dans ce contexte, les nanotechnologies et les biotechnologies seraient au coeur d'une nouvelle industrie à haute valeur ajoutée** dont les implications pratiques s'étendent à de très nombreux domaines. Ainsi, pour les nanotechnologies on évoque des marchés qui se mesurent en millier de milliards d'euros par an (réf. Roco, 2001). Ce sont d'ailleurs ces considérations qui motivent la course aux investissements dans le domaine de la recherche que se livrent les grands blocs que sont l'Europe, les Etats-Unis, L'Asie.

A cette conception positive, et largement partagée, du progrès scientifique et technique se superpose une progressive remise en cause du Progrès, concept philosophique et sociologique plus large. **Idéologie triomphante au XIX<sup>ième</sup> siècle et mythe dénoncé au cours du XX<sup>ième</sup> siècle (réf. Valade, 1992) , le Progrès est de plus en plus contesté voire même parfois violemment rejeté.** Comme le souligne Klein (réf. Klein, 2003), nous sommes désormais au antipodes de l'optimisme des Lumières, la science n'étant plus garante du Progrès mais trop souvent, affirme-t-on, responsable d'une chute hors de quelque paradis perdu. C'est maintenant la Nature qui rassure, alors même qu'elle a semblée si longtemps impitoyable à nos ancêtres qui ont cherché obstinément à échapper à son contrôle pour s'en rendre "Maître et possesseur", comme le souhaitait Descartes. Désormais, rappelle Klein, la science inquiète et l'on est de moins en moins sûrs que les performances techniques nous ont rendus plus libres et plus heureux.

Dans la mesure où cette situation nouvelle peut conduire à l'immobilisme voire au renoncement, il convient de mieux comprendre le phénomène. Valade (1992), dont nous nous inspirerons ici, rappelle que le Progrès est une idée religieuse sécularisée qui puise son origine dans une conception linéaire du temps fondée en Occident par la théologie chrétienne (notamment par Saint Augustin) pour laquelle toute l'histoire humaine peut s'interpréter comme la réalisation du dessin de Dieu : l'irrésistible marche ascendante de l'Humanité vers son créateur et, eschatologiquement, vers un âge d'or. Cette conception s'oppose radicalement à celle des "sociétés traditionnelles" pour lesquelles l'âge d'or se situe, au contraire, à l'origine du monde, le temps qui passe ne pouvant que se traduire par la dégradation et la corruption de l'état primitif. La notion de Progrès ne commencera à être implicitement contesté que par le mouvement du Romantisme, exaltant la Nature, dans la seconde moitié du XIX<sup>ième</sup> siècle. Ce n'est toutefois qu'au XX<sup>ième</sup> siècle que la rationalité, et ses avatars la science et la technologie et, in fine, le Progrès seront remis en cause explicitement voire mis en procès (réf. Boy, 1999). De plus, il convient de noter la lente prise de conscience, au cours de ce processus, du fait que le Progrès n'a aucune des caractéristiques qui lui était traditionnellement attribuées : il n'est, en effet, ni global, ni continu, ni nécessaire, ni univoque, ni linéaire, ni cumulatif comme l'affirmait le scientisme. Au contraire, des auteurs tels que Lessing, Levy-Strauss, Popper, etc., souligneront son caractère local, discontinu et non linéaire. Le Progrès emprunte des chemins multiples, complexes et souvent imprévisibles.

Peut-on encore croire au Progrès ? s'interrogent les philosophes Bourg et Besnier (réf. Bourg, 2000). S'il s'agit du progrès des connaissances scientifiques et techniques, chacun s'accorde à en constater la formidable explosion depuis le début du XX<sup>ième</sup> siècle et les très nombreuses retombées positives, proprement inimaginables il y a encore un siècle voire quelques décennies. Mais, s'il s'agit du progrès matériel, économique, social, voire moral et spirituel, la réponse est nécessairement plus ambiguë. En particulier, c'est le lien mécanique entre la connaissance, la richesse et le bonheur qui a été démenti. De plus, les effets pervers (les "dégâts du Progrès") sont de plus en plus perceptibles tant au niveau local que global

(voir, par exemple, la controverse sur l'effet de serre). Bien plus, se développe le sentiment légitime que "nous ne maîtrisons plus la maîtrise" (réf. Klein, 2003) des phénomènes et des forces que la science nous a permis de comprendre. La complexité inextricable du réel s'impose à nous avec son corollaire le risque comme composante irréductible de l'agir humain. Enfin, depuis Sorel en 1906 (les "Illusions du Progrès"), l'interrogation politique sur la manière dont sont réparties les retombées positives du Progrès est récurrente chez certains auteurs et mouvements sociaux. Portée initialement par les marxistes, cette contestation est maintenant reprise par les altermondialistes.

**Toutefois, si la réflexion et la prise de recul est toujours légitime, et souvent nécessaire, il ne faudrait pas "jeter le bébé avec l'eau du bain", c'est-à-dire minimiser les réelles contributions de la science et de la technologie, annihiler les espoirs considérables dont elles restent porteuses, par exemple dans le domaine médical, et les mettre en accusation pour des conséquences dont elles ne portent pas nécessairement la responsabilité.** Qui est prêt, pour ce qui le concerne personnellement, à tourner le dos à la science et à la technologie ?

## 2. Premiers questionnements

### Nanomatériaux et gelée grise : la montée d'un questionnement

Plusieurs personnalités se sont interrogées très tôt sur les risques potentiels des nanosciences et des nanotechnologies. Dans son livre « Engines of Creation », au tout début du chapitre « Engines of Destruction », Eric Drexler évoque dès 1986 les dangers potentiels de ses assembleurs : « à moins que nous n'apprenions à vivre avec eux de façon sûre, notre avenir sera sans doute stimulant mais bref ». **Le danger le plus emblématique des peurs associées aux nanotechnologies est sans doute la « gelée grise ».** L'idée de départ est que l'on pourrait un jour fabriquer des machines de taille nanométrique capables de travailler à l'échelle de l'atome. La « gelée grise » est un amas de telles machines qui, étant devenues autonomes, pourraient nuire à l'espèce humaine voire tout dévorer pour se reproduire, y compris la croûte terrestre. Ce dernier scénario est parfois appelé l'écophagie. On cite aussi souvent Bill Joy (le cofondateur de Sun Microsystem) pour son article, «Why future doesn't need us », publié en 2000 dans la revue Wired, long monologue sur la nature humaine et les implications parfois négatives des nanosciences et de l'intelligence artificielle (réf. Joy, 2000). Comme Drexler, il évoque le phénomène de la gelée grise mais aussi les armes qui pourraient être développées.

Depuis quelques années, une réflexion au niveau institutionnel accompagne la montée en puissance des nanotechnologies. On peut citer le livre édité en

2001 par M. Roco et W.S. Bainbridge intitulé « Les implications sociétales des nanosciences et des nanotechnologies » (réf. [Roco, 2001](#)). De même, le congrès américain s'est interrogé sur l'impact des nanosciences sur la société lors de l'audition du 9 avril 2003 (réf. [Congrès, 2003](#)). Un point notable est aussi l'article « Mind the Gap » publié dans la revue "Nanotechnology" début 2003 dans lequel A. Mnyusiwalla, A.S. Darr et P.A. Singer s'interrogent sur le fossé croissant entre la science et la société dans le domaine des nanotechnologies, fossé dont les conséquences leur semblent inquiétantes (réf. [Mnyusiwalla, 2003](#)). En fait, **l'année 2003 a sans doute marqué un tournant puisque ce débat, encore récemment confidentiel, est devenu l'affaire d'un nombre croissant d'acteurs.** La publicité, et des promesses excessives voire utopiques accompagnant ces recherches, ont sans doute contribué à faire mûrir la question chez beaucoup. Trois événements proches dans le temps semblent avoir produit le déclic.

Il y a eu tout d'abord **le roman de Michael Crichton, « La Proie »**, publié en novembre 2002 (la traduction française est parue en octobre 2003 (réf. [Crichton, 2003](#))). Ce roman met en scène une société spécialisée dans les nanotechnologies qui fabrique des nanorobots destinés à voler en essaim pour former une caméra virtuelle. Il est intéressant de noter que dans l'histoire cette société utilise des systèmes qui sont des hybrides de bactéries et de nanomachines pour réaliser la fabrication. Les créateurs perdent ensuite le contrôle de leur invention... Ce livre a eu un fort succès et, même si cela n'était pas le but de l'auteur, il **est très souvent cité comme révélateur des inquiétudes que peuvent soulever les nanosciences.**

Un point fort quasiment simultané a été la **publication en janvier 2003 par le groupe ETC** (réf. [ETC](#)) **de manifestes assez longs et virulents mettant en garde contre les nanotechnologies**, qu'il appelle « atomotechnologies ». Le message principal de ce groupe est la nécessité d'un moratoire dans la production de produits à base de nanotechnologies, en l'attente d'une connaissance suffisante de leurs effets sur l'environnement et le vivant. Dans «The bigdown » (réf. [ETC bigdown, 2003](#)) le groupe évoque les dangers associés aux nanotechnologies dont le développement est décrit en quatre étapes, les deux premières correspondant à la situation actuelle ou au futur proche : les nanomatériaux, la manipulation de nanoobjets pour réaliser des assemblages avec un positionnement précis, la création d'usines voire de nanorobots travaillant à l'échelle moléculaire et, enfin, la convergence avec le vivant. En ce qui concerne les nanoparticules générées par cette industrie, le groupe ETC évoque leur possible accumulation dans l'organisme, leurs effets toxiques potentiels, par exemple d'une façon similaire à l'amiante, et leur capacité à pénétrer partout y compris dans la chaîne alimentaire. Ils évoquent aussi des dangers à long terme tels que la gelée grise, la possibilité de créer des matériaux inconnus en quelque sorte « contre nature ». Dans le rapport intitulé « *Green Goo : Nanobiotechnology Comes Alive* » (réf. [ETC green goo, 2003](#)), le groupe ETC s'intéresse plus particulièrement au croisement entre nanotechnologies et biotechnologies. Cette convergence est discutée notamment sous l'angle des scénarios

catastrophes qu'elle pourrait elle-même générer comme la gelée verte, ensemble d'organismes artificiels issus des biotechnologies devenus hors contrôle.

Le troisième événement a été **la prise de position du Prince Charles en avril 2003 qui** a eu naturellement un fort retentissement médiatique. Le prince **a demandé aux scientifiques britanniques de s'interroger sur les « risques énormes pour l'environnement et la société » induits par les nanotechnologies** en faisant allusion en particulier à la gelée grise. Cette intervention a donné lieu à de vives réactions aussi bien des milieux politiques que scientifiques. Quoiqu'il en soit, le gouvernement britannique a mandaté la société royale (des sciences) et l'académie royale des technologies pour mener une enquête sur les nanotechnologies, leurs promesses mais aussi les dangers potentiels qu'elles seraient susceptibles d'entraîner. Le groupe de travail ad hoc, coordonné par Ann Dowling, professeur à l'université de Cambridge, a débuté ses travaux le 12 juin 2003 en vue d'un rapport pour la fin du printemps 2004.

Les événements se sont ensuite enchaînés. Le groupe Verts-Alliance Libre Européenne du parlement Européen s'est également saisi de la question et a organisé le 11 juin 2003 à Bruxelles une journée spécifique sur le sujet, en invitant en particulier les associations ETC et Greenpeace à s'exprimer. Certains députés verts, comme Caroline Lucas, ont manifesté ouvertement leur position contre les dangers du développement des nanosciences en l'absence de réglementation comme dans l'article du Guardian « nous ne devons pas être aveuglés par la science » ([réf. Lucas, 2003](#)). On peut également noter un important rapport publié par Greenpeace ([réf. Greenpeace, 2003](#)), document qui traite à la fois de l'intelligence artificielle et des nanosciences. Ce document dresse un tableau équilibré de la situation en discutant les avantages et les inconvénients des nanotechnologies. Force est de constater que ce débat continue, en particulier dans les pays anglo-saxons, avec des articles dont des exemples récents particulièrement significatifs sont ceux de Rick Weiss dans le Washington Post ([réf. Weiss, 2004](#)) ou celui de Philip Ball ([réf. Ball, 2003](#)). Bien que de manière moins active, ce débat se développe également en France.

## **Un premier bilan de la situation actuelle**

Après cette brève histoire des événements générateurs de cette controverse, on peut tenter de dresser un bilan de la situation actuelle, et la mettre en regard avec ce qui est connu d'un point de vue scientifique.

### Gelée grise et verte

Le phénomène marquant est incontestablement « la mode » de la gelée grise, mentionnée par les uns, à la façon d'un "produit d'appel" pour attirer le lecteur avant de passer à d'autres dangers comme les nanomatériaux,

évoqué par les autres (rares) comme un réel danger. Il peut être plus intéressant de discuter globalement les technologies permettant de manipuler la matière au niveau moléculaire. En fait, il existe deux manières d'aborder la question.

La première démarche consiste à s'inspirer de celle de George Whitesides dans « The Once and Future Nanomachine » en considérant la biologie (réf. [Whitesides, 2001](#)). Les cellules fournissent en effet des exemples variés d'organelles, systèmes qui travaillent à l'échelle moléculaire, par exemple pour propulser, fournir de l'énergie, synthétiser, réparer. Un point notable est que, comme l'a souligné Georges Whitesides, **le scénario de la « gelée verte », équivalent biologique de la gelée grise s'est déjà produit au niveau planétaire (en notre faveur !)** : la terre était autrefois un monde minéral avec une atmosphère de gaz carbonique. La création de la vie a profondément modifié cet environnement jusqu'à changer complètement le sol, l'atmosphère et le climat. Il existe d'autres équivalents triviaux : lorsque des microorganismes se reproduisent de façon incontrôlée en « mangeant » leur environnement on parle de colonisation, d'infection ou d'épidémie. Les limites sont fixées par la disponibilité des milieux en matières nutritives qui permettent le développement de ces organismes et les moyens de défense des organismes hôtes. La nanomachine naturelle la plus célèbre est peut être le ribosome dont le rôle a été compris dans les années 1960. Ce complexe de protéines et d'ARN, d'une taille de l'ordre de 25 nm, est capable de synthétiser les protéines nécessaires à la cellule à partir des acides aminés qui y sont présents et d'informations issues des gènes.

Bien avant la biologie moléculaire, on a mis en oeuvre une connaissance empirique du vivant pour produire des matériaux (bois, laine, coton, soie, cuir, papier, etc.), fabriquer de la nourriture, voire modifier celle-ci (fermentation alcoolique, panification, fabrication de fromage, etc.). Avec les progrès de la science, en particulier dès la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, ces manipulations ont pris un caractère systématique donnant lieu au développement de véritables industries (voir les célèbres travaux de Pasteur, par exemple). Ensuite est venue l'époque des biotechnologies. A partir des années 1970, on est devenu capable d'intervenir sur la machinerie génétique pour produire de nouveaux organismes modifiés. Certaines molécules telles que l'insuline sont désormais fabriquées par de tels organismes. Ainsi, dans un litre de culture cellulaire destiné à produire de l'insuline il peut ainsi y avoir 10 000 milliards de ribosomes qui assemblent des protéines, chacun au rythme d'une dizaine d'acides aminés par seconde. On est loin de maîtriser le fonctionnement du vivant mais nous l'utilisons depuis fort longtemps. On peut citer également les résultats récents d'Angela Belcher du MIT (réf. [Belcher, 2004](#)). Celle-ci est capable depuis peu d'utiliser des phages modifiés pour qu'ils aient des « doigts » capable de « saisir » des nanoobjets semi-conducteurs, dans le but de réaliser des assemblages. Des projets plus ambitieux existent. Par exemple, Craig Venter, président de l'institut des énergies alternatives biologiques localisé dans le Maryland, envisage de créer de nouveaux types d'organismes, à partir d'un génome artificiel. Cet institut a obtenu des subventions importantes du DOE dans le but avoué de créer de nouveaux

organismes capables de fabriquer de l'hydrogène ou de séquestrer le dioxyde de carbone (réf. [IBEA, 2004](#)). L'idée des promoteurs est de partir de l'existant et de procéder par modifications. Ainsi, il ne s'agit donc pas à proprement parler d'une bactérie synthétique. On ne sait pas si, et encore moins comment, on peut créer une cellule vivante à partir de ses composants qui, mis en présence, ne s'assemblent pas spontanément pour créer une bactérie vivante. A la fin du XIX<sup>ième</sup> siècle, ce constat distinguait déjà radicalement Pasteur, fondateur de la microbiologie pour laquelle le vivant dérive du vivant, des tenants de la théorie de la génération spontanée dont le chef de file était Pouchet. En un siècle, on a toutefois résolu un problème intermédiaire : la fabrication de virus synthétiques (polio en 2002 et phage phi x174 en 2003) résultat extraordinaire en soi même si les virus sont des systèmes infiniment plus simples considérés comme non vivants. Par exemple l'ADN du phage fabriqué récemment contient 5000 paires de bases contre 580000 pour la bactérie *Mycoplasma Génitalium* qui est l'une des plus simples. A long terme, la convergence nanotechnologique pourrait apporter une maîtrise beaucoup plus poussée du fonctionnement cellulaire au niveau moléculaire : synthèse de différents éléments, fabrication d'éléments de cellules hybrides vivant-artificiel, etc. Graig Venter pourra-t-il faire mentir Pasteur grâce aux nanobiotechnologies ?

La deuxième approche plus générale est celle d'Eric Drexler. Celui-ci considère que l'existence du monde du vivant est la preuve de la faisabilité d'une nanoindustrie et il se réfère souvent à la biologie pour étayer son raisonnement. Toutefois, il avance que le processus évolutif mis en œuvre par la nature ne lui permet pas de réaliser des systèmes franchement différents sans protéines et sans ADN (de façon plus schématique, jamais l'évolution ne transformera un cheval en jeep) alors que d'autres systèmes, éventuellement fondés sur une chimie différente, sont envisageables, par exemple avec moins de contraintes en terme de température de fonctionnement. La nature voire l'existence théorique de ces autres systèmes, qui permettraient de créer des « nanorobots » ou des « cellules artificielles », restent pour l'instant des questions largement ouvertes. D'une certaine manière la complexité de cette question est la même que celle de la création de la vie. La nature a réussi cet exploit au prix d'un long processus évolutif, et le fonctionnement du vivant est d'une incroyable complexité qui dépasse celle de toutes les machines créées par l'homme. La nature n'a d'ailleurs pas à proprement parler créé des nanorobots autonomes mais des systèmes interdépendants qui s'organisent en cellules voire en organismes et en écosystèmes. Sera-t-il un jour possible de créer de tels nanorobots ex nihilo ? Autour de cette question, les opinions vont de la mise en doute du sérieux (voire plus) de leur auteur à une position du type : « la question n'est pas de savoir si c'est possible mais quand ». On trouve dans ce domaine de nombreuses informations sur le site de l'institut Foresight (réf. [Foresight](#)). Pour aller plus loin, on peut s'interroger sur la possibilité théorique de l'existence de tel ou tel dispositif sans préjuger du détail de la technique. Richard Smalley, prix Nobel de chimie 1996 pour sa découverte du fullerène, le fait par exemple dans le numéro de septembre 2001 de la revue *Scientific American*. Dans cet article intitulé « Of chemistry, love, and nanorobots », l'auteur montre les limites d'une vue trop « mécaniste » et pas assez « chimique » des processus à l'échelle

atomique (réf. Smalley, 2001). Il souligne en particulier les contraintes liées au positionnement des atomes pour que les bonnes réactions chimiques aient lieu (il faudrait des "doigts" qui seraient trop encombrants) et celles liées au caractère collant de la matière à petite échelle. Eric Drexler rétorque que le vivant y arrive (les "doigts" sont des protéines ou d'autres molécules repliées pour avoir la bonne forme et exercer localement les forces adéquates) sans toutefois proposer un schéma plus compatible avec ses vues. Une controverse, qui continue fin 2003 dans la revue *Chemical & Engineering News*, en a découlé (réf. Smalley, 2003). Il existe également des travaux plus prospectifs sur le sujet comme celui de R. Freitas dans lequel l'auteur essaie de résumer ce qu'on peut dire sur de tels systèmes du point de vue de la chimie et de l'approvisionnement en énergie (réf. Freitas, 2001). D'une certaine manière, cette discipline rejoint l'exobiologie puisqu'on cherche la possibilité de réaliser le vivant de manière alternative.

La communauté scientifique travaille à la compréhension des phénomènes gouvernant les propriétés des objets nanométriques, mais aussi à la mise au point de dispositifs permettant le traitement de l'information ou des actions à ces échelles. Il y a des avancées spectaculaires qui s'inspirent souvent de la biologie (voir l'article récent de Philip Ball (réf. Ball, 2002)). Un exemple emblématique est la réalisation en 1999 par Carlo Montemagno et ses collaborateurs de l'université Cornell d'un « nanomoteur » de moins de 100 nanomètres de diamètre en utilisant un enzyme très répandu, l'ATPase (réf. Montemagno, 2002). Toutefois, on est encore fort loin du scénario de la gelée grise. Il existe en effet une différence fondamentale entre ces réalisations et les microorganismes ou les assembleurs tels qu'on peut les imaginer : le manque de complexité. Une cellule est un enchevêtrement de centaines d'espèces différentes de molécules qui interagissent suivant des lois complexes qui dépassent notre compréhension actuelle. Les réalisations passées et envisagées restent incomparablement plus simples que celles du vivant et on ne conçoit pas comment celles-ci pourraient donner lieu à une « biologie parallèle », c'est-à-dire à des objets capables de se reproduire et d'agir suivant des scénarios complexes. D'une certaine manière, on pourrait faire l'analogie avec la mécanique telle que nous la connaissons : bien que l'on maîtrise la mécanique, on ne voit pas comment fabriquer des robots capables de se reproduire.

Pour résumer on peut énoncer les deux affirmations suivantes :

- Les réalisations dans le domaine des nanosciences sont stupéfiantes mais passer à des « nanorobots » demande la maîtrise d'une dimension supplémentaire : la complexité. Un scénario catastrophe du type gelée grise « Drexler » semble exclu au moins à moyen terme.
- Le monde du vivant nous donne toutefois accès à cette complexité et on peut imaginer que des questions se poseront plutôt à l'interface nanotechnologies -biotechnologies.

## Nanomatériaux et nanoparticules

En fait, le phénomène de la gelée grise joue souvent le rôle d'un symbole pour attirer l'attention mais **le risque de référence souvent cité pour les nanosciences est la commercialisation de nanomatériaux ou de composants nuisibles qui pourraient «s'émietter»** pendant leur usage ou lors d'un processus de dégradation dans l'environnement en fin de vie. Certaines « miettes », de taille nanométrique pourraient s'accumuler dans l'environnement sans se dégrader, perturber les écosystèmes voire avoir des effets toxiques sur l'Homme. On met souvent en avant, tour à tour, l'indestructibilité de certaines espèces ou au contraire leur extrême réactivité, leur capacité à adsorber et à transporter des molécules dangereuses et, bien sûr, leur extrême mobilité. Référence est souvent faite aux OGM qui sont un exemple de produit commercialisé avant qu'une réflexion exhaustive, et des études approfondies d'impact, aient été menées. Comme discuté ci-dessus, les positions les plus extrêmes vont jusqu'à la demande de l'établissement d'un moratoire sur les nanomatériaux en attendant une meilleure compréhension de leur comportement. La situation est en fait assez complexe.

D'un côté les matériaux structurés à l'échelle nanométrique ou les nanoparticules ne sont en aucun cas un nouveau type de produits étranges issus d'une nouvelle industrie high tech. En effet :

- La structuration à l'échelle nanométriques est la règle depuis que l'Homme utilise des matériaux : le bois, les textiles naturels, les os, les roches, le ciment. De même la plupart des aliments que nous ingérons sont structurés à l'échelle moléculaire !

**Les nanoparticules errantes ne nous sont pas non plus étrangères. Elles sont générées par la nature en centaines de millions de tonnes par an** (embruns, volcanisme, poussières désertiques) **mais aussi par l'industrie** (par exemple le noir de carbone (production de 8 millions de tonnes par an) ou le dioxyde de titane (2 millions de tonnes par an) et la combustion (dizaines de millions de tonnes par an), en particulier celle qui a lieu dans les moteurs qu'ils soient diesel ou à essence. D'une certaine façon, tout processus de combustion est de la nanotechnologie ! Ainsi, en atmosphère urbaine il y a typiquement entre 10 millions et 20 millions de particules par litre d'air (dans la gamme <100 nm), ce qui représente entre 1 et 2 nanogrammes de matière ([Oberdörster, 2002](#)).

On ne peut donc diaboliser un produit sous prétexte qu'il est associé au préfixe « nano ». En particulier, **un moratoire « global » sur les nanomatériaux** tel que celui proposé par le groupe ETC **semble difficile à mettre en œuvre car, pris au pied de la lettre, il concernerait la plupart des produits actuellement commercialisés et devrait s'étendre au gaz et à l'essence dont la combustion envoie directement des nanoparticules dans l'atmosphère.** Pour compliquer le débat, on pourrait arguer du fait que certains produits pourraient apporter des bénéfices immenses à l'environnement justement du fait de la présence de « nanomorceaux » faiblement liés, donc susceptibles de se détacher et

d'être digérés par l'environnement: des matériaux qui se dégraderaient naturellement dans l'environnement (on peut par exemple imaginer une matière plastique qui se décomposerait comme le bois ou la paille). Un autre exemple est les filtres solaires dont certains sont composés de nanoparticules de dioxyde de titane qui pénètrent effectivement dans l'épiderme, condition nécessaire pour que le produit soit actif. Il ne semble pourtant pas préférable de s'exposer à l'action mutagène des rayons UV du soleil. Utiliser des produits à base de molécules absorbant les ultraviolets plutôt que de nanoparticules serait tout aussi absurde, ces molécules étant également de taille nanométrique. Enfin, des nanoparticules pourraient être sciemment injectées dans le corps à des fins de diagnostic (par exemple des marqueurs fluorescents) ou thérapeutique (vectorisation de médicaments).

**D'un autre côté, on ne peut se contenter d'un optimisme aveugle sous ce seul prétexte. Tout d'abord, il existe des exemples historiques de produits commercialisés en masse qui, bien que présentant un fort intérêt, se sont révélés nocifs :** l'amiante et le DDT. Par ailleurs, on sait que l'on trouve partout dans l'environnement les traces d'éléments rejetés par les produits que nous utilisons de telle sorte que toute décision de production de masse a des conséquences. On peut citer ainsi l'exemple du platine de pots catalytiques (réf. [Barbante, 2001](#)). L'introduction de ce catalyseur a eu des effets bénéfiques sur la qualité de l'air mais, en contrepartie, on retrouve du platine, à des niveaux certes très faibles, jusque dans les glaces du Groenland. Ensuite, il existe des raisons croissantes de penser que certaines nanoparticules peuvent avoir un effet néfaste. On peut citer par exemple des travaux récents sur la toxicité des nanotubes (réf. [Service 2004](#)) qui montrent clairement des effets nocifs sur le rat ou la souris, effets qui semblent dus à l'indestructibilité des nanotubes dans le poumon (formation de granulomes). S'il est trop tôt pour extrapoler de tels résultats en terme de toxicité pour l'homme ces résultats montrent clairement que des travaux sont nécessaires pour trancher.

Une synthèse de la situation a été très récemment faite à Bruxelles par un panel de dix sept experts (réf. [Commission Européenne 2004](#)). Parmi leurs conclusions on peut noter :

- L'importance de mener des travaux complémentaires de toxicologie car on ne peut pas prédire les propriétés de ces particules à partir de celles du matériaux massif, d'établir des normes et procédures
- Cela concerne également les particules « traditionnelles » comme celles issues de la combustion.

En ce qui concerne ce dernier point, l'hypothèse selon laquelle la pollution de l'air par de telles particules est nocive a été formulée il y a une dizaine d'années et cette idée a depuis fait son chemin à la fois par le fait d'études épidémiologiques et d'observations plus détaillées notamment en ce qui concerne leur pénétration et leur transport dans le corps humain. On les suspecte d'affecter les poumons, de provoquer des effets sur le cœur et le cerveau. Il faut noter que la pénétration de telles particules dans le cerveau après inhalation a été mise en évidence par Gunter Oberdörster de l'université de Rochester (New York) et ses collègues (réf. [Oberdörster, 2004](#)).

**La question qui se pose de façon aiguë est de savoir comment on peut étiqueter un produit comme potentiellement**

**dangereux du fait des nanoparticules qu'il pourrait rejeter dans l'environnement durant son cycle de vie. Cela demande de considérer les propriétés physico-chimiques de ce matériau, le devenir dans l'environnement d'éventuelles nanoparticules rejetées, une meilleure compréhension du comportement de ces particules dans l'organisme (voies de pénétration, mécanismes d'élimination, effets pathogènes). C'est probablement un sujet de recherche qui sera en pleine expansion dans les années à venir avec sans doute son lot de surprises quant aux produits qui nous sont familiers. Probablement, cela apportera même un éclairage nouveau sur les questions de pollution urbaine.**

### La vie privée et les puces

Depuis trois décennies, l'électronique et l'informatique se sont continûment perfectionnées et, surtout, les coûts ont baissé considérablement. Les télécommunications se sont aussi fortement développées avec la généralisation des satellites, de l'Internet et maintenant de divers réseaux sans fils. On parle désormais d'objets communicants et d'informatique « pervasive ». Tout ces progrès ont mené à l'émergence de façon de plus en plus aiguë d'un questionnement sur le risque croissant que chaque individu ne maîtrise plus les informations relatives à sa vie privée qui sont numérisées, transmises et stockées, avec des possibilités inégalées de traitement d'informations provenant de plusieurs sources interconnectées. Les nanotechnologies, qui ne sont pas les seules incriminées, ont un rôle potentiellement important dans la mesure où elles permettent le développement de nouveaux capteurs, la miniaturisation, peut être la conception de systèmes à basse consommation d'énergie donc autonomes et l'augmentation des puissances de traitement.

#### Le RFID et ses avantages

**Un exemple particulièrement important est le développement des RFID** (Radio Frequency Identification Devices). **Ces appareils** contiennent un émetteur et des circuits logiques. Lorsqu'ils sont interrogés, ils **peuvent émettre des informations**, souvent un « code produit électronique » **avec assez de bits pour identifier individuellement chaque objet manufacturé dans le monde.** Sous des formes plus sophistiquées ils peuvent également recevoir de l'information qu'ils restituent ensuite. Sous leur forme passive, ces objets tirent leur puissance du champ électromagnétique émis par le système qui les interroge, et n'ont donc pas besoin de batterie. La portée dépend de la fréquence utilisée : elle va de quelques centimètres à une vingtaine de mètres pour des systèmes passifs dont la puissance est nécessairement limitée à beaucoup plus pour les systèmes avec alimentation. La taille typiquement millimétrique peut être largement submillimétrique pour les modèles les plus récents. Ces appareils dont le concept est ancien (le principe a été utilisé pendant la deuxième

guerre mondiale pour l'identification d'avions de combat), se sont perfectionnés durant les années 1970 et ont été progressivement implémentés dans une série d'utilisations telles que les systèmes d'accès (badges, péages), les identifications à courte portée (matériel en stock, anti-vol, identification d'animaux). Le prix unitaire de ces dispositifs est dans la gamme de 10 centimes à quelques euros mais on s'attend dans les quelques années qui viennent à une diminution de prix rendant ces dispositifs pas plus chers qu'une étiquette. Leur usage semble donc sans limite. Les avantages potentiels sont considérables :

- Système de suivi des stocks dans les entreprises : chaque carton voire chaque produit contenant un RFID sera individuellement suivi par une chaîne de capteurs de l'usine à la caisse enregistreuse du supermarché, avec potentiellement un enregistrement d'informations telles que chronologie des manipulations dont il a fait l'objet, la chaîne du froid, etc.
- Objets capables d'informer leur environnement de leur présence. Les possibilités sont multiples. On peut citer par exemple des appareils électroménagers munis de lecteurs RFID, capables de s'adapter à leur contexte telle une machine à laver capable de s'informer du linge qu'elle doit laver (pour peu qu'y soit fixé un RFID), un réfrigérateur capable de faire des commentaires sur son contenu (valeur nutritive, suggestion de recettes, produits périmés).
- Systèmes d'authentification : badges d'accès, moyen de paiement, antivol, certificat d'authenticité, marquage de produits dangereux et peut être marquage de billet de banque (on peut concevoir ainsi qu'un billet volé devienne inutilisable).
- Capteurs sur des objets difficiles à relier par fil. Ce dispositif permet par exemple de mesurer de façon simple la pression dans un pneu. On peut imaginer un matériau contenant des RFID capables de se surveiller eux-mêmes ("auto-monitoring"). Cela permettrait par exemple de créer des structures contenant un réseau de RFID capables de donner l'alerte si elles sont sollicitées dans une zone dangereuse (contrainte, température, fatigue), en imitant ainsi le mécanisme de la douleur.
- Suivi médical : identification d'un patient et lecture instantané des informations médicales le concernant, contrôle de prise de médicament.

Il faut ajouter que les RFID constituent une première génération de systèmes communicants. Les possibilités vont bien au-delà. On peut citer en particulier à la fin des années 1990 les développements sur les « poussière intelligentes » (smart dust), minuscules objets (à terme submillimétrique) regroupant de véritables processeurs avec un mini systèmes d'exploitation, capables de communiquer avec leurs voisins pour former un réseau réparti ou avec une base plus lointaine. Ils peuvent en outre contenir des capteurs ou des actionneurs. Développés à l'origine par Kris Pister à Berkeley ils font l'objet d'une commercialisation par la société DUST inc ([réf. Dust, 2004](#)). Les usages qui viennent à l'esprit sont le renseignement militaire, la surveillance de l'environnement, les réseaux de capteurs répartis : dans le corps pour usage médical, sur la peau pour réaliser des interfaces homme machine, dans une structure, dans un fluide, dans l'environnement. Ce dernier aspect commence à être testé avec toutefois des systèmes assez

gros, la miniaturisation n'étant pas nécessaire (réf. Secoas, 2004). On peut ainsi envisager à terme de pulvériser sur un site un réseau réparti de milliers de poussières qui serait en fait un gigantesque capteur.

### Premières oppositions

Toutefois, **des mouvements d'opposition se sont organisés pour limiter l'usage des RFID**, dont CASPIAN c'est-à-dire Consumers Against Supermarket Privacy Identification And Numbering (réf. CASPIAN). Fin 2003, une trentaine d'associations américaines a écrit un manifeste sur les limitations de l'usage des RFID (réf. Privacy Right, 2003). Ce manifeste constitue une synthèse des diverses questions qu'on peut résumer en deux points :

- Le fait qu'ils puissent être facilement dissimulés et, pour peu qu'ils soient actifs, donner des informations sur leur porteur (que transporte-t-il, combien a-t-il d'argent sur lui ?).
- L'identificateur unique fait qu'un objet est univoquement connu. Cela permet des recoupements d'informations. Le cas le plus évident est celui du recoupement avec l'identité du porteur de cet objet (croisement avec sa carte bancaire par exemple) mais des combinaisons plus subtiles sont possibles à partir d'informations apparemment insignifiantes. On peut ainsi le localiser en suivant ses vêtements ou ses pneus de voiture mais aussi étudier ses habitudes à des fins de marketing. La tentation de recouper les informations sera d'autant plus forte que le système d'identification des RFID s'accompagnera du développement de bases de données géantes.

**Les associations concernées proposent en général un encadrement de l'utilisation des RFID** : signalisation claire des produits en contenant, transparence sur leurs spécifications et leur finalité et les informations qu'ils véhiculent, limitation des données et des possibilités de recoupement, voire même possibilité d'enlever le RFID. Les défenseurs de cette technologie mettent en avant leur portée limitée, la facilité d'arrêter les ondes qu'ils émettent, le fait que la surveillance de ces objets s'arrête à la porte du magasin. Ce mouvement de méfiance a été exacerbé par une série de tests « officiels » effectués sur des consommateurs ou simplement prévus, à tel point que l'association CASPIAN avait lancé des campagnes de boycott. Il s'en est suivi un mouvement de recul de ces sociétés.

Des réflexions ont été lancées depuis peu dans ce domaine pour étudier dans quel cadre on pourrait utiliser les RFID . On peut citer trois initiatives :

- Le premier workshop sur la vie privée et les RFID a été organisé par le MIT le 15 novembre 2003. Il a permis en particulier des débats sur l'acceptabilité de cette technologie mais aussi des solutions techniques comme le « killing » sorte d'apoptose déclenché des RFID (réf. MIT, 2003).
- Une réflexion organisée en août 2003 par l'Etat de Californie qui envisage de légiférer sur le sujet (réf. Californie, 2003).

- Une prise de position de la CNIL en France qui assimile les données des RFID à des données personnelles et les soumet donc à une stricte réglementation de leur usage (réf. CNIL, 2003). Plus généralement une réunion des différentes autorités de régulation qui a eu lieu à Sidney en 2003, a donné lieu à un texte (SIDNEY, 2003).

### L'implantation humaine

La technique permet d'implanter un RFID ou un smart dust dans le corps. On le réalise déjà en routine pour l'identification des animaux domestiques. Cela peut aussi être envisagé pour des êtres humains. Des essais ont déjà eu lieu sur des volontaires tels une famille en Floride en mars 2002 (réf. Goldman, 2002) ou un journaliste de Miami (réf. Gosset, 2003) en avril 2003. En 2002, 2500 personnes se seraient portées volontaires pour être implantées. Le produit en cause est le verichip™ de la société Applied Digital Solution (réf. Verichip). Cette société commercialise également le Digital Angel dispositif (non encore implantable) interfacé avec le réseau GPS pour localiser leur porteur (réf. digital angel). Les utilisations de ces systèmes sont potentiellement considérables :

- Marquage d'individu que l'on veut surveiller. Ainsi un système anti-kidnapping est déjà proposé par la société SOLUSAT au Mexique (réf. solusat), pays dans lequel les disparitions d'enfants sont un problème sérieux. Une autre utilisation est le suivi médical de patients dont l'hospitalisation n'est pas nécessaire mais ayant des symptômes tels que l'on puisse être amené à avoir besoin de les localiser (maladie d'Alzheimer par exemple).
- Moyen de paiement. Le Veripay™ est proposé par la société ADSX pour permettre les paiements sécurisés à la manière d'une carte à puce mais la puce est implantée sous la peau (réf. veripay).
- On peut imaginer que ces puces soient utilisées comme moyen d'accès à des locaux sécurisés en lieu et place de badges qui peuvent toujours être perdus ou volés.

Ce système a soulevé un émoi considérable. La première raison est évidemment les interrogations sur les dérives auxquelles on peut arriver. On peut l'envisager pour surveiller toutes sortes de catégories d'individus. Une autre composante à prendre en compte est l'aspect religieux. On trouve actuellement un nombre considérable de sites web qui nomment ces dispositifs « marque de la bête » en référence au texte de l'Apocalypse de Jean (chap. 13 vers. 11, 16 et 17) :

*11 Puis je vis monter de la terre une autre bête, qui avait deux cornes semblables à celles d'un agneau, et qui parlait comme un dragon.*

.....

*16 Et elle fit que tous, petits et grands, riches et pauvres, libres et esclaves, reçussent une marque sur leur main droite ou sur leur front, 17 et que personne ne pût acheter ni vendre, sans avoir la marque, le nom de la bête ou le nombre de son nom.*

Cette citation présente l'intérêt majeur de nous montrer que les peurs générées par ces nouvelles technologies mobilisent des affects qui puisent très profondément dans la psyché humaine, notamment au réservoir des symboles, images, archétypes liés au sacré. C'est ce que nous analysons brièvement dans la section suivante.

### **3. Les peurs "sociétales" vis à vis des nanosciences**

Les peurs que génèrent les nanosciences et les nanotechnologies ne peuvent aisément se résumer sans paraître simpliste, car elles traduisent des préoccupations variées, impliquent des acteurs divers et mobilisent des arguments de nature hétérogène. Toutefois, on retrouve toujours, avec des dosages divers selon les cas, trois composantes de base qui renvoient à des thèmes fondamentaux : "la perte de contrôle" , "le mauvais usage" et "la transgression" que l'on pourrait comparer à des archétypes, au sens de Carl Gustav Jung autour desquels semblent d'ailleurs se structurer toutes les peurs liées à la science et aux technologies (voir figure 1 et Farouki, 2001). Ces trois thèmes sont naturellement étroitement liés et peuvent, dans certains cas, être très intriqués. Les distinguer nettement, comme nous le faisons ici, a seulement pour objectif de clarifier leur présentation et de fournir une grille d'analyse qui sera utilisée ultérieurement. Il apparaît intéressant de préciser les contours de ces thèmes fondamentaux en caractérisant tout d'abord quelques peurs qui leur sont classiquement associées, en évoquant le lien qui peut être fait avec les nanosciences et les nanotechnologies avant de préciser leur lien avec la tradition, notamment judéo-chrétienne. Le fait d'analyser ces peurs sous cet angle n'implique nullement qu'elles seraient, a priori, illégitimes ou discréditées. Si l'angoisse est, pour les psychologues, sans cause et sans fondement objectif, la peur, en revanche, s'enracine toujours dans une certaine réalité. Bien que les nombreuses prédictions de fin du monde énoncées à l'occasion de développements scientifiques antérieurs se sont révélées (pour l'instant) sans fondement, l'histoire montre aussi que certaines peurs peuvent être fondées par l'expérience. On peut citer, à titre d'exemple, l'accident de la centrale de Tchernobyl ou la dissémination volontaire de produits peu dégradables qui se sont révélés dangereux comme l'amiante ou le DDT. Par ailleurs, il convient de noter que la peur elle-même peut être salutaire dans la mesure où, comme le souligne fortement Hans Jonas ([réf. Jonas, 1990](#)), elle constitue en quelque sorte un signal d'alerte qui permet à la société de réfléchir au problème, d'identifier la nature exacte des risques (notamment en développant un programme de recherche, si nécessaire) et de prendre les mesures de prévention qui s'imposent. Jonas qualifie cette démarche d'heuristique de la peur à laquelle il accorde, du point de vue socio-politique, une valeur positive.

#### **La perte de contrôle**

**Le premier cas de figure est celui d'une expérience qui tourne mal ou d'un produit mis sur le marché qui provoque par la suite des effets négatifs irréversibles qui peuvent aller jusqu'à**

## **l'extinction de l'espèce humaine voire la disparition de la planète.** Trois scénarios peuvent être envisagés :

- Un phénomène brutal qui ne laisse pas le temps de réagir. L'irréversibilité est due dans ce cas à la puissance des forces mises en jeu dont le contrôle échapperait aux savants. Un tel schéma concerne plutôt des processus mettant en jeu des énergies élevées comme c'est le cas pour le nucléaire ou la physique des particules.
- Le contrôle peut être perdu parce qu'il n'y a pas de moyen d'agir. Le cas typique est la dissémination de produits qui s'avèrent finalement nocifs. L'irréversibilité vient alors de leur dispersion, de leur longue durée de vie, voire de leur capacité à se reproduire. Dans le domaine qui nous concerne, la préoccupation principale est celle de la dissémination de fragments de nanomatériaux. Cette situation est d'autant plus crédible qu'elle s'est déjà produite à diverses occasions avec des produits industriels (voir le rapport Caillard (réf. [Caillard, 2004](#))). C'est notamment le cas de toutes les substances dites phytosanitaires (insecticides, fongicides, etc.) utilisées abondamment en agriculture intensive depuis le milieu du XX<sup>ième</sup> siècle. Le cas d'entités capables de se reproduire, est encore plus préoccupant dans la mesure où un arrêt de la source ne suffit même plus à stabiliser la situation, concerne le vivant (microorganismes, ADN des OGM) ou le scénario de la gelée grise évoquée ci-dessus.
- Il faut ajouter à ces cas « aigus » de perte de contrôle les cas « chroniques », comme la pollution, la modification de la couche d'ozone ou l'accumulation de gaz à effet de serre. Dans ce cas, les produits apportent suffisamment de bienfaits à un groupe d'individus (localisés géographiquement, par exemple) ou bien aux individus d'une époque donnée pour que la situation se perpétue puisque les inconvénients n'en sont pas nécessairement perçus par ceux-là même qui bénéficient des avantages. La perception des bienfaits et des effets négatifs peut même ne pas faire l'unanimité : le débat porta alors au moins autant sur l'évaluation des avantages et des inconvénients de la technologie en cause (voire du mode d'organisation sociale) que sur l'iniquité éventuelle de la répartition des risques. Jusqu'au rapport du GIECC (1995) qui permit de converger sur un consensus scientifique international, les gaz à effet de serre se situaient, il y a quelques années, dans cette perspective. L'irréversibilité de la situation n'est plus liée seulement à une technologie donnée qu'il suffirait, en quelque sorte, de changer pour voir disparaître le problème et les risques associés. Elle est alors due au fonctionnement de la "société humaine" dans son ensemble que ce soit du point de vue des mécanismes économiques ou des rapports de force entre Etats. La solution ne peut passer que par une modification des dispositifs de régulation de la société humaine qui, s'agissant notamment de traités internationaux, sont particulièrement difficiles à négocier pour aboutir à une position consensuelle (accord sur les CFC, protocole de Kyoto).

Si cette perte de contrôle supposée inquiète tant, voire panique, certains de nos concitoyens c'est qu'elle est susceptible d'entraîner, du moins le croit-on, des bouleversements considérables voire la fin du monde (la fin d'un

monde ?). Dans l'imagerie traditionnelle de l'Occident, cette peur se structure autour de la notion d'Apocalypse.

L'Apocalypse qui, l'étymologie nous l'indique, est un dévoilement, une révélation, est en effet un thème fondamental de l'eschatologie judéo-chrétienne (réf. Cohn, 1983) . Ce thème s'appuie, en fait, sur une vision très spécifique du temps et de la signification de l'histoire, que ne véhiculent pas par exemple les métaphysiques orientales (comme le bouddhisme). En particulier, il s'agit d'une vision cyclique de l'histoire qui s'oppose à la conception linéaire du temps, notion augustinienne mais dont la société bourgeoise a permis l'épanouissement au XIX<sup>ième</sup> siècle, et à laquelle est fortement associé la notion de "Progrès". Le retour de l'âge d'or, à la fin du cycle de l'humanité dite adamique, serait précédée d'une période où le feu et le sang s'abattraient sur la terre afin d'en chasser définitivement les forces des ténèbres. L'Apocalypse de Jean est l'exemple le plus emblématique de ce type de littérature. Ce thème est donc associé, depuis 2000 ans, au jugement de Dieu (ou jugement dernier, voir ci-dessous).

Au cours du XX<sup>ième</sup> siècle, l'affaiblissement des croyances religieuses en Occident, s'est peu à peu accompagné de l'idée que, la science et la technologie fournissant des "armes" (au sens propre et figuré) de plus en plus redoutables, il devient plausible que l'Homme puisse, de lui-même, provoquer [l']Apocalypse. De nombreux romans reprennent ce thème de la catastrophe mondiale d'origine humaine. Alors que le thème de l'Apocalypse se nourrissait encore, au tournant du XX<sup>ième</sup> siècle, d'événements dus à des phénomènes naturels (les volcans : Krakatoa (1883), La Montagne Pelée (1902); les séismes : San Francisco (1906), Valparaiso et Messine (1908); la montée des eaux produisant un nouveau Déluge; la démographie, avec le Péril jaune, etc.), la peur de la fin de la civilisation se justifie désormais par les capacités auto-destructrices, supposées incontrôlables, mises à la disposition de l'Homme (réf. Boia, 1989). En 1929, toutefois, le thème de l'Apocalypse commença à se nourrir de nouvelles sources. En effet, cette année là, le New York Times rapportait à ses lecteurs les propos d'éminents savants selon lesquels l'univers entier pourrait accidentellement s'enflammer comme une traînée de poudre à canon. Ce sentiment s'est ensuite fortement accentué après la découverte, peu avant la seconde guerre mondiale, de la réaction de fission de l'uranium. On craignit alors qu'une réaction en chaîne déclenchée expérimentalement, par exemple par une bombe atomique, ne puisse se transmettre à la terre entière. Il fallu l'intervention de savants célèbres comme Langevin pour calmer le jeu.

## **Le mauvais usages de ces découvertes**

Une innovation qui ne présente a priori aucun des risque de perte de contrôle mentionné ci-dessus peut avoir des conséquences sérieuses voire se révéler nocive si elle est utilisée dans un but non prévu initialement, en particulier par des personnes mal intentionnées. **Il existe en fait divers niveaux d'appréhension de ce détournement d'usage en fonction de l'utilisateur malveillant.**

Cela peut tout d'abord être un individu auquel un nouveau produit ou une nouvelle technologie détournés de leur usage donnera un pouvoir de nuisance accru. Des exemples évidents en sont l'apparition de nouveaux types de délinquances associés aux nouvelles technologies et, bien sûr, le terrorisme. La dissémination de souches d'anthrax à la fin de l'année 2001 aux USA en est un exemple particulièrement illustratif. L'utilisation du gaz Sarin en 1995, dans le métro de Tokyo, par la secte japonaise Aum Shinrikyo qui, incidemment, prétendait ainsi provoquer le déclenchement de l'Apocalypse (!) en est un autre exemple marquant. Ces technologies sont, malgré les apparences, relativement sophistiquées et nécessitent le concours de spécialistes très compétents (donc en petits nombre) ce qui, par ailleurs, facilite les investigations des services de sécurité.

Cela peut également être un sous-ensemble d'individus, une compagnie privée, ou un Etat, qui utilise une nouvelle technologie pour affecter progressivement la vie de chacun. On pense bien sûr à un Etat totalitaire qui imposerait telle ou telle pratique pour mieux asservir ses sujets, un thème exploité abondamment par la littérature (Le meilleur des mondes d'Aldous Huxley, 1984 de Georges Orwell, etc.). Mais la réalité peut être beaucoup plus subtile, plus banale aussi et donc plus plausible. Le contexte du moment peut en effet faire que tel ou tel dispositif de surveillance ou de contrôle soit adopté tout à fait démocratiquement pour faire face à des risques jugés intolérables (certaines formes de délinquance, terrorisme). Cela peut aussi être le cas lorsqu'une priorité s'impose d'elle-même comme de nourrir la population : cet argument est d'ailleurs avancé explicitement pour promouvoir les OGM avec l'objectif hautement louable de combattre la faim et la malnutrition. Sans même nécessairement faire de procès d'intention à quiconque, des citoyens américains se sont ainsi opposés à l'utilisation généralisée des RFID par crainte d'une dérive (même involontaire) et d'une perte de contrôle de l'utilisation sociale de ces dispositifs, amenant leurs promoteurs à une marche arrière, sans doute provisoire du fait des formidables avantages pratiques de ces dispositifs. De même, l'implantation de puces sous la peau, la généralisation des techniques de biométrie et des tests ADN peut faire craindre, même si les intentions initiales sont positives, à la création subreptice d'un monde dans lequel disparaîtraient progressivement, et insensiblement, les libertés fondamentales. L'eugénisme du siècle dernier, de triste mémoire, pourrait également ressurgir en s'appuyant sur ces nouvelles (bio)technologies, éventuellement sous une autre forme, le concept de race laissant par exemple la place à la prédisposition à une maladie donnée. Enfin, un thème qui revient est le développement de nouvelles armes fondées sur les nanotechnologies, par exemple sous la forme de micromachines qui seraient une extension naturelle des armes biologiques.

Le thème sous-jacent à toutes ces peurs, explicitement structuré autour des notions de Bien et de Mal, est celui de l'Apprenti Sorcier.

L'Apprenti Sorcier est un thème classique de la littérature, en particulier romanesque. Le thème central en est que le savant, dénué de toute éthique, est capable de mettre en action les forces naturelles qu'il a découvertes, et pas seulement pour le Bien (comme le voudrait implicitement la délégation que la société consent au savant pour ses

recherches). Non seulement, l'Apprenti Sorcier est supposé irresponsable mais, à un certain point de sa démarche, il perd même le contrôle des forces qu'il a lui-même déchaînées. Par ailleurs, les moyens scientifiques et technologiques à la disposition de l'Apprenti Sorcier le rendent désormais apte à déclencher lui-même l'Apocalypse (voir ci-dessus), qui ne relève donc plus uniquement d'une fatalité imposée aux hommes par la volonté de Dieu. Plus encore, l'action néfaste du savant sur le monde pourrait être volontaire. Des personnages populaires comme le Dr. Faust symbolisent le savant fou ayant, pour ainsi dire, pactisé avec le Diable (réf. Dabezies, 1980). De grands écrivains, tels que J.W. Goethe, H.G. Wells, M. Shelley, Th. Mann, A. France, ont exploité régulièrement ce thème (connu en fait depuis le XV<sup>e</sup> siècle), qui a inspiré également le théâtre et l'art lyrique. Notons que plus récemment (fin des années 70 et début des années 80) le thème de l'Apprenti Sorcier n'a plus seulement été associé (et peut être de moins en moins) au savant ou à l'ingénieur atomiste mais au biologiste, apte désormais à manipuler la Vie elle-même.

Après les découvertes atomiques voici venir le règne de la biologie et la possibilité de manipulations génétiques qui font resurgir le mythe du surhomme. Le "Progrès" s'annonce menaçant : les apprentis sorciers s'arrêteront-ils à temps ? s'interrogeaient déjà Rifkin et Howard dès 1979 (réf. Rifkin, 1979). On sait comment cette problématique s'est développée au cours des années 80, notamment sur le plan éthique, amenant certains chercheurs tel Testard (réf. Testard, 1986) à arrêter d'eux-mêmes leurs propres recherches.

## La transgression

**D'autres développements de la science et de la technologie peuvent aussi susciter des réactions parce que « l'on va trop loin » ou que « on veut être l'égal de Dieu ».** Chacun a, ancré en lui, une définition qui lui est personnelle des limites que l'Homme ne doit pas dépasser qu'il se réfère ou non à une conception sacrée du monde. Cette définition s'appuie sur un ensemble d'éléments disparates mais où chacun recherche une cohérence : ses connaissances scientifiques, les précédents, les mythes communs à son aire culturelle et ses propres croyances religieuses. Ces réactions, en cas de perception d'une transgression, peuvent être violentes même en l'absence de danger immédiat. Si de plus ces travaux présentent une part d'incertitude quant à leurs conséquences, la perception du risque est décuplée à l'idée plus ou moins consciente d'un possible « châtement divin ».

Un exemple classique concerne les projets d'expériences permettant de faire ce que nul n'a jamais fait ce qui revient, en quelque sorte, à une transgression implicite. Il y a de nombreux précédents et peu de directeurs d'installations en construction font l'économie de devoir réfuter des scénarios apocalyptiques dès lors que celles-ci sont les premières de leur genre. Par exemple, ce fut le cas du Tokamak TFR construit au début des années 70 au CEA de Fontenay-aux-Roses pour l'étude de la fusion thermonucléaire, machine qui était à l'époque la plus puissante au monde.

Certains opposants au projet craignaient que le plasma chaud de cette machine ne soit le siège de champs électriques intenses qui provoqueraient une catastrophe.

L'un des cas les plus récents est le Relativistic Heavy Ion Collider à Brookhaven aux USA (réf. RHIC, 2000). Le but de ce collisionneur est de provoquer des collisions frontales à très haute énergie entre des ions lourds les portant à des températures de l'ordre de celles qui régnaient quelques fractions de secondes après le big bang. Une telle affirmation ne pouvait pas laisser indifférent et deux scénarios ont fait le tour du monde. Le premier était l'apparition d'un trou noir, dans la zone d'interaction, qui aurait alors pu engloutir la planète toute entière. L'autre scénario était l'apparition de particules « étranges » (en référence à l'étrangeté qui est une propriété de certains quarks) qui auraient avalé la terre atome par atome... Un panel composé de scientifiques a été créé pour tenter d'apporter des réponses rationnelles à de telles inquiétudes.

Toutefois, les cas qui semblent les plus évocateurs, tant au plan émotionnel qu'au plan de la réflexion éthique qu'ils entraînent, sont relatifs aux avancées des biotechnologies. En effet, celles-ci remettent en cause, potentiellement, des conceptions fondamentales relatives à la Vie, la personne humaine et même la structure anthropologique des sociétés (problème des filiations, par exemple). Le clonage, l'expérimentation sur les cellules souches ont suffisamment été sous les feux de la rampe pour qu'il soit inutile de les développer ici. Les nanosciences et les nanotechnologies présentent à cet égard deux développements qui conduiraient l'Homme à transgresser le tabou de la Vie. Le premier concerne la capacité de transformer la matière vivante d'une manière inégalée pouvant aller jusqu'à la création d'hybrides, de monstres, de chimères ou d'autres êtres "contre-nature" à l'image de ce qu'on trouve dans le roman « la proie » de Crichton. Les biotechnologies classiques peuvent déjà le faire mais la nouveauté, imagine-t-on, proviendrait d'une démultiplication des possibilités humaines de manipulation. Le second, plus grave encore, serait d'être capable de créer la Vie elle-même à partir de matière inanimée. L'Homme serait alors l'égal de Dieu (voir ci-dessous)...

Ainsi, même lorsque le danger potentiel n'est pas clairement identifié, ni la certitude d'aboutir acquise, la simple idée de transgresser l'interdit de la connaissance semble générer la peur. L'archétype de l'Arbre de la Connaissance renvoie à l'interdiction religieuse de la Connaissance, et plus encore de la mise en oeuvre, des "forces cachées" de la Nature. Cet interdit est commun à diverses aires culturelles : le mythe grec de Prométhée qui fut condamné à avoir le foie déchiré par l'aigle de Zeus pour avoir dérobé aux dieux le feu sacré de la Connaissance y est également rattaché. Toutefois, l'Occident chrétien reste particulièrement marqué par le récit biblique de la chute d'Adam, ancêtre supposé, et symbole, de l'humanité toute entière. Cette chute est sensée résulter du "péché", c'est à dire de la transgression du tabou majeur : l'homme a tenté de se faire le rival de son Créateur, en accédant aux connaissances interdites. Une malédiction pèse sur celles-ci et la recherche des forces cachées de la Nature est sacrilège ("*Le vain et curieux désir de recherche, appelé connaissance et science*", dénoncé par Saint Augustin). La prise de conscience des "formidables

énergies dissimulées" dans la matière, qui ne demandent qu'à être libérées pour entraîner, à nouveau, le monde dans le chaos n'a fait qu'accentuer, dans une fraction de la population et plus ou moins inconsciemment, le sentiment que l'humanité avait atteint, au vingtième siècle, l'extrême limite de ce qui lui était permis.

Enfin, l'archétype de l'Arbre de la Connaissance est resté associé, pendant près de 16 à 18 siècles, à l'imagerie mentale, très riche et complexe, de l'alchimie. Dans cet "Art", la transmutation de la matière (par exemple des métaux supposés vils) ou, à un niveau plus subtil et plus profond, l'illumination individuelle du "chercheur", s'accompagne nécessairement d'une forme de mort selon un processus psychologique qui a été étudié en détail par Jung ([réf Jung, 1971](#)). Re-naissance (ou "résurrection") et mort sont donc les deux faces d'un même processus de transformation radicale de l'Homme et, par extension, du monde (voir le thème de l'Apocalypse ci-dessus). Soddy et Rutherford, ont d'ailleurs eu une conscience claire de ce lien très fort avec cet arrière plan historico-psychologique puisqu'ils auraient évoqué explicitement, au moment crucial de leur découverte, à la fois le caractère "alchimique" de la transmutation élémentaire et le risque d'exclusion que leur faisait prendre ce qualificatif au sein de la communauté scientifique ([réf. Weart,1988](#)) . Cependant vers 1930, Rutherford assumait ce rôle et publiait un ouvrage de vulgarisation sur la physique atomique intitulé "*The Newer Alchemist*".

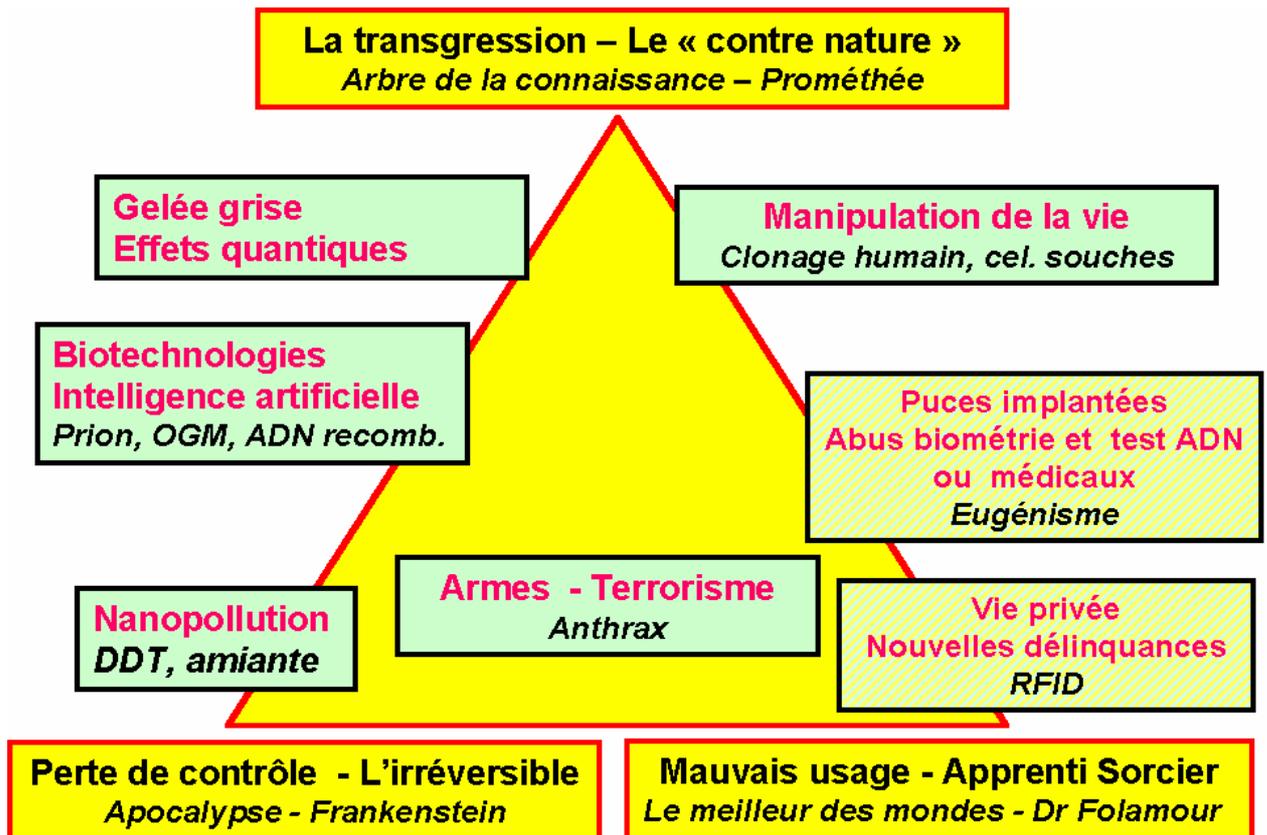


Figure 1 : Positionnement de quelques peurs ou interrogations soulevées par des technologies nouvelles ou leur usage dans le triangle transgression – perte de contrôle – mauvais usage.

## Une nouvelle controverse ?

### **Cette crainte émergente des nanosciences et des nanotechnologies est-elle justifiée ? Est-elle préoccupante ?**

Une controverse susceptible de mettre en cause ces recherches et leurs applications est-elle en train de naître ? Comment l'analyser ? Que faire ? **Pour tenter une approche de ces questions, il convient, d'une part, de tirer les leçons d'autres dossiers (nucléaire, OGM, etc.) dans lesquels une incompréhension et un manque de dialogue entre les acteurs** (experts, public, associations..) n'ont pas permis de traiter ces questions de manière optimale. D'autre part, il faut aller puiser dans les travaux des sociologues des sciences et des techniques les concepts, outils et méthodes permettant de progresser, dans le respect des diverses parties prenantes à la controverse.

En effet, **les réponses spontanées des chercheurs, ingénieurs et industriels à une contestation de leurs activités** (voire parfois à de simples interrogations) **sont, on le sait maintenant pour les**

**avoir expérimenté, le plus souvent insuffisantes et inefficaces.**

Considérer que les arguments des contestataires sont irrationnels et que leur posture est illégitime, qu'une information du public (voire son éducation !) lèverait les doutes et calmerait les craintes ou que l'on est face à un prétendu complot ne permet jamais de comprendre réellement la situation. En outre, ces approches ne permettent pas de bâtir une stratégie pour éviter de s'enfoncer dans une impasse dont on ne sort jamais indemne. Les sociologues font valoir que les acteurs ont toujours, de leur point de vue, de bonnes raisons d'agir comme ils le font et que leurs logiques et leurs "visions du monde", même lorsqu'elles ne sont pas scientifiques, sont a priori légitimes. Une telle approche admet l'existence de rationalités plurielles dans la société.

Par ailleurs, le discours savant peut être perçu comme contradictoire, ce que Jean-Pierre Dupuy qualifie de "double langage" de la communauté scientifique (réf. Dupuy, 2004). En effet, la médiatisation croissante des résultats de la science et de la technologie conduit trop souvent les spécialistes à affirmer que telle ou telle avancée est une véritable révolution, un changement de paradigme ou une rupture technologique majeure. Il faut bien en effet convaincre les décideurs de financer les recherches dans un contexte de contraintes financières accrues. En revanche, dès que des craintes surgissent dans le public, les mêmes dispensent un discours lénifiant qui se veut rassurant : en fait, tout est sous contrôle, ces techniques sont parfaitement maîtrisées, la Nature le fait depuis toujours, etc. Le discours sur les nanosciences et les nanotechnologies n'échappe pas à ce schéma.

Pour mieux appréhender les craintes émergentes liées aux nanosciences et aux nanotechnologies, il faut comprendre que celles-ci s'inscrivent dans un contexte beaucoup plus large d'évolution globale de la société. Au delà des spécificités de la matière à laquelle elles s'appliquent (le "nanomonde"), ces craintes ne sont que l'un des multiples éléments d'un changement sans doute profond du rapport de la société à la science et la technologie. Les sociologues des sciences et des techniques proposent, selon l'école à laquelle on fait référence, divers modèles interprétatifs de ces évolutions sociétales. L'un des plus riches, et peut être des mieux adaptés à la situation des nanosciences, pourrait être celui du grand sociologue allemand Ulrich Beck (réf. Beck, 2001) qui s'est interrogé sur ce qu'il nomme la "société du risque".

**Selon Beck, notre société moderne est en train d'évoluer vers une société d'un type nouveau dans laquelle le risque et sa gestion joue un rôle central.** Il s'agit d'une société "réflexive" dont les modalités de fonctionnement sont encore en émergence. Parmi les éléments qui la caractérisent, on peut citer tout d'abord, sans prétention à une analyse exhaustive et approfondie des conceptions de Beck, le fait que les menaces y sont désormais internes. Elles résultent pour l'essentiel, non plus des risques liés à la Nature, mais des activités mêmes de l'Homme d'où, d'ailleurs, le glissement dans les thèmes fondamentaux autour desquels s'organisent les peurs (voir ci-dessus). **Les savoirs, la maîtrise technique perfectionnée, les processus de décision, etc. tout,**

**ou presque, recèle désormais, selon Beck, des risques.** De plus, la croyance et la confiance illimitée dans la science et la technologie, source supposée d'un Progrès inéluctable et caractéristique de la période scientifique, fait désormais place à une conception plus modeste. La "science en action", pour reprendre l'expression de Latour, a un caractère plus local, contextualisé qui s'accompagne d'incertitudes et de doutes légitimes nourrissant les interrogations et les craintes d'une société réflexive. Enfin, la démocratie représentative, fondée sur les conceptions philosophiques de Montesquieu et de Locke, serait progressivement remplacée, même si elle est encore évidemment le modèle institutionnel de nos Etats, par une démocratie délibérative dont le philosophe contemporain Habermas serait le penseur.

Dans une telle société, la compréhension de l'innovation nécessite un nouveau modèle que proposent Callon et ses collaborateurs (réf. Callon, 2001). L'approche classique, désormais dépassée et inopérante, supposait un objet technique défini a priori, avec ses fonctionnalités, diffusant dans une société présentant une acceptabilité plus ou moins grande vis à vis de l'innovation avec, parfois, des résistances qu'il fallait alors vaincre. **Dans le modèle proposé par la sociologie des sciences et des techniques, l'objet technique voit ses caractéristiques techniques et sociales négociées et produites simultanément.** Il est intéressant que ce modèle présente des analogies avec les débats qui ont lieu autour des RFID et d'éventuelles caractéristiques techniques comme le « killing » discuté ci-dessus. L'extension spatiale de l'innovation se produirait grâce à un processus complexe de "traduction" au sein d'un réseau d'acteurs dont l'innovateur doit avant tout se faire des alliés qui ont alors leurs propres intérêts et raisons d'en propager l'usage.

Au delà de cette analyse générale sur l'évolution de nos sociétés, que peut-on proposer concrètement pour mieux gérer les difficultés qui résultent du progrès scientifique et technique dans le domaine des nanosciences et des nanotechnologies ? Le fait d'avoir distingué trois catégories de problèmes (rattachables à des thèmes fondamentaux de la peur) va nous permettre d'aborder de manière différenciée les difficultés auxquelles nous serions éventuellement confrontés.

## L'expérience qui finit mal

La première difficulté consiste à tenter de se prémunir des cas où une expérience "finit mal" et des expériences qu'il vaudrait mieux ne pas faire, notamment pour des raisons éthiques. Par exemple, des effets négatifs peuvent être de prime abord sous-estimés voire même être passés inaperçus aux yeux des promoteurs de ces innovations. Ces problématiques se situent dans notre diagramme (voir figure 1) entre la perte de contrôle et la transgression. Il faut tout d'abord noter que l'organisation de la recherche et de ses modes de financement est en théorie un premier élément de réponse, le bailleur de fond étant en principe amené à porter un jugement. Cependant, dans la plupart des systèmes de recherche moderne il n'en est rien que ce soit à cause de la multiplicité et de l'imbrication des financeurs

qui fait qu'aucun n'a la vue d'ensemble nécessaire, que les responsabilités sont diluées et que les intérêts des acteurs peuvent diverger. Il reste donc à inventer et mettre en œuvre des dispositifs sociaux et/ou institutionnels pour maîtriser la recherche en évitant toute dérive "obscurantiste". Le but est de permettre le débat de la science et de la technologie, sans que toute interrogation ne vous place immédiatement dans le camp des ennemis supposés du Progrès, est normal. Quelles sont les incertitudes ? Quels sont les risques réels et perçus ? Quels sont les avantages et les inconvénients, pour qui et quand ? Y a-t-il une "vraie" controverse au sein même de la communauté scientifique ? Quels sont les intérêts en jeu ? Si la controverse n'est jamais irréversible, l'objet technique n'est pas non plus inéluctable.

Ainsi, **Callon** (réf Callon 2001) **propose la mise en place de "forums hybrides" qui seraient des dispositifs délibératifs majeurs pour la gestion de controverses éventuelles liées à des innovations scientifiques et technologiques.** Ces lieux de débat et d'interaction entre acteurs hétérogènes (chercheurs, industriels, technologues, institutionnels, associations, public, etc.) doivent avoir des règles du jeu explicites qui, en particulier, face un lien clair entre ce qui s'élabore au sein du forum et le processus de décision à proprement parler. La décision ne peut être, le plus souvent, la simple traduction des conclusions, même consensuelles, émergeant du forum mais, inversement, ces dernières doivent être prises en compte, d'une manière explicitée dès le départ, dans le processus décisionnel. Le forum hybride, selon Callon, doit être un lieu d'exploration des options et d'apprentissage collectif des parties prenantes dans lequel l'identité des acteurs est susceptible d'évoluer voire de se construire. Par ailleurs, les savoirs profanes ne sauraient y être discrédités et considérés comme illégitimes mais, au contraire, respectés et pris en compte. Finalement, le forum hybride permet la mise en place concrète d'une gestion procédurale de la controverse.

Même lorsqu'il n'y a pas, à proprement parler, de controverse ou de danger imminent, ces lieux de débats et de discussion permettraient aussi une information honnête, compétente et contradictoire du public. Il est en effet essentiel de séparer le réel de l'imaginaire pour se concentrer sur les "vraies" questions. Par exemple, de notre point de vue, la peur des nanotechnologies utilisant des effets quantiques est largement infondée. Ce point de vue doit pouvoir être exprimé, justifié et, si nécessaire, critiqué de manière ouverte. En revanche, la question du couplage des nanotechnologies avec le complexe, ou la biologie est un sujet qu'on ne peut balayer d'un revers de main.

L'un des problèmes les plus difficile à traiter est celui de la globalisation de la recherche. Comment arrêter seul une recherche (à supposé que cela soit pleinement justifié) si elle se poursuit ailleurs sur la planète ? La concurrence intense que se font les nations et les firmes multinationales dans le domaine militaire et économique rend probablement vain, comme le souligne Dupuy (réf. Dupuy, 2004), l'espoir d'être en capacité d'arrêter des recherches dont certains acteurs attendent des avantages décisifs dans la compétition mondiale pour la puissance et la domination. Seul un consensus international, sur des points très précis et assortis de dispositifs de suivi et

de contrôle, est susceptible d'arriver à un tel résultat. De ce point de vue, un consensus Européen est un premier pas important.

## La perte de contrôle

La deuxième difficulté consiste à éviter la perte de contrôle liée à la mise sur le marché d'un produit, notamment si celui-ci se diffuse dans l'environnement, la chaîne alimentaire, etc. d'une manière qui est difficilement (ou pas) rattrapable. Un exemple typique en est le cas des OGM dont les opposants semblent craindre, d'une part, qu'ils puissent être dans certains cas néfastes pour la santé, ce qui jusqu'à preuve du contraire est infondé scientifiquement dans les cas qui ont été en débat, et, d'autre part, qu'ils modifient le génome des espèces naturelles au cours de leur dissémination, ce qui semble en effet inéluctable et irréversible. Ici encore le débat libre et ouvert entre toutes les parties prenantes dans un lieu où toutes les avis peuvent être écoutés et respectés, sur le modèle des forums hybrides, semble une piste à explorer pour éviter tout rejet de principe dû, pour l'essentiel, à une absence de discussion préalable.

Que recouvrirait dans ces situations, l'application d'un principe de précaution raisonné, que nous comprenons comme un principe d'action prudente (et non d'immobilisme) lorsque prévaut une forte incertitude scientifique et de possibles conséquences irréversibles et inacceptables ? Trois éléments semblent importants :

tout d'abord, il serait utile de mettre en place des mécanismes d'approbation de la mise en place sur le marché des produits potentiellement à risque sur le modèle. Il va de soi qu'il conviendrait de trouver un point d'équilibre raisonnable entre la dynamique de l'innovation, qui doit continuer à être encouragée, et la protection de la population et de l'environnement. De nombreuses normes et réglementations existent, l'une des plus connues étant l'autorisation de mise sur le marché (AMM) pour les médicaments. Les questions qui se posent sont :

**1)° le dispositif actuel est-il suffisant ?, 2°) quels processus mettre en place pour réglementer l'apparition de nouveaux produits ? Ces questions, déjà évoquées pour les nanomatériaux, ne sont pas des plus triviales comme discuté ci-dessus. Pourtant elles sont rendues d'autant plus pressantes que les innovations sont nombreuses et variées, et que ces produits sont parfois commercialisés en masse.**

Par ailleurs, un dispositif de suivi et d'alerte, léger mais efficace, pourrait également fonctionner en s'inspirant du réseau de vigilance pour les médicaments.

Enfin, l'incertitude scientifique doit impliquer la mise en œuvre de recherches spécifiques visant à la réduire autant que possible. Le risque étant désormais une composante normale de nos sociétés technoscientifiques, comme le souligne Beck, ces dernières doivent apprendre à adopter une attitude réflexive vis à vis de leurs propres

pratiques et productions caractérisée notamment par le fait que la recherche accompagne systématiquement l'action. En particulier, une question qui se posera de plus en plus est de savoir quel type de recherche il faut encourager pour optimiser les mécanismes discutés aux deux points précédents.

## Le mauvais usage

La troisième difficulté porte sur la nécessité d'éviter, autant que possible, un mauvais usage des découvertes scientifiques et des innovations technologiques. Outre que la notion de "mauvais usage" peut éventuellement être relative, il est a priori difficile d'obtenir un consensus car des intérêts divergents peuvent être en cause. Par exemple, certains acteurs, notamment les producteurs et les distributeurs, vont souligner l'avantage considérable qui résulterait de l'utilisation systématique des RFID pour la gestion et la traçabilité de certains produits alors que d'autres, en particulier les consommateurs et les citoyens, pourront y voir un risque social pour les libertés individuelles. Il n'y a aucune vérité absolue là-dedans et ces deux points de vue peuvent se défendre. En démocratie, seule la société dans son ensemble est à même d'identifier ce qui est un progrès réel, pour ce qui la concerne, et il s'agit donc toujours d'une question politique, au meilleur sens du terme. Dans ce contexte, le consensus de la majorité, que traduira la législation, se forge par le dialogue entre les acteurs. Cette négociation suppose, d'une part, une fonction de délégation et de médiation (donc de procédures d'identification des représentants, des porte-parole) et, d'autre part, une fonction d'arbitrage et de décision assurée par le pouvoir politique. Elle implique la transparence de l'information et des procédures de décision qui sont précisément contestées, à tort ou à raison, dans divers domaines technoscientifiques (nucléaire, OGM, etc.). De plus, certaines recherches ou développements heurtent suffisamment des intérêts communs et/ou des valeurs fondamentales de nos sociétés pour faire l'objet d'une interdiction. Ici encore, **la globalisation de la recherche limite considérablement l'impact réel d'une démarche locale** (c'est-à-dire au niveau national). **Seul un consensus international permet d'espérer aboutir comme ce fut le cas, malgré les dérives, pour les armes chimiques et bactériologiques.**

**On ne saura pas, avant de les avoir testées, si ces propositions permettent effectivement de gérer efficacement les controverses qui émergent régulièrement à propos des avancées scientifiques et technologiques. Le cas des nanosciences pourrait, à cet égard, être exemplaire puisque les préoccupations et les peurs qu'elles suscitent se placent en amont même de leur développement.** Par conséquent, les acteurs de ce domaine, au premier rang desquels les chercheurs et les ingénieurs, ont la possibilité d'intégrer ces interrogations légitimes au cœur même de leur démarche de recherche et d'innovation.

## Références

1. Ball 2002: « Natural strategies for the molecular engineer » par Philip Ball. Nanotechnology 13 (2002) page 15-28.
2. Ball 2003: "Nanotechnology in the firing line" par Philip Ball le 23 décembre 2003 . Disponible sur le site de nanotechweb à l'adresse <http://www.nanotechweb.org/articles/society/2/12/1/1>
3. Barbante 2001: Carlo Barbante, Audrey Veysseyre et al. Environmental Science and Technology Vol 35, N°5, 2001 p. 835. Voir aussi résumé sur le site de l'UJF
4. <http://www.ujf-grenoble.fr/ujf/fr/actualites/page/2001/fevrier/recherche.phtml>
5. Beck 2001 : « La société du risque : sur la voie d'une autre modernité » par Ulrich Beck. Alto-Aubier, 2001.
6. Belcher 2004 : « Virus based toolkit for the directed synthesis of magnetic and semiconducting nanowires" Science Vol 303 9 janvier 2004 by C. Mao et al.
7. Boia 1989 : "La fin du monde-une histoire sans fin » par Lucian Boia. La Découverte, Paris, 1989.
8. Boy 1999 : « Le progrès en procès » par Daniel Boy , Paris, Presses de la Renaissance, 1999.
9. [Bourg](#) 2000 : « Peut-on encore croire au progrès? » par Dominique Bourg et Jean-Michel Besnier PUF, 2000.
10. Caillard 2004 : « Rapport De La Commission D'orientation Du Plan National Santé Environnement » par Isabelle Momas, Jean-François Caillard , Benoît Lesaffre disponible sur le site [www.premier-ministre.gouv.fr/ressources/fichiers/rapport\\_PNSE.pdf](http://www.premier-ministre.gouv.fr/ressources/fichiers/rapport_PNSE.pdf)
11. Californie 2003 : Voir <http://siliconvalley.internet.com/news/article.php/3064511>
12. CNIL 2003: Communication de Philippe Lemoine commissaire à la CNIL. Sur le site : [http://www.cnil.fr/fileadmin/documents/approfondir/rapports/RFID\\_communication.pdf](http://www.cnil.fr/fileadmin/documents/approfondir/rapports/RFID_communication.pdf)
13. Callon 2001 : « Agir dans un monde incertain - Essai sur la démocratie technique » par Michel [Callon](#), Pierre [Lascoumes](#), Yannick [Barthe](#). Le Seuil, 2001.
14. CASPIAN : Le site de ce mouvement est <http://www.nocards.org/>

15. Commission Européenne 2004 : « Nanotechnologies: a preliminary risk analysis on The basis of a workshop organized in Brussels on 1–2 march 2004 by the health and consumerProtection directorate general of the European Commission » téléchargeable sur le site [http://europa.eu.int/comm/health/ph\\_risk/documents/ev\\_20040301\\_en.pdf](http://europa.eu.int/comm/health/ph_risk/documents/ev_20040301_en.pdf).
16. Cohn 1983 : « Les fanatiques de l'Apocalypse » par Norman Cohn. Payot, Paris, 1983
17. Congrès 2003 : Voir texte des débat sur le site <http://www.house.gov/science/hearings/full03/index.htm>
18. Crichton 2003 : « La proie » par Michael Crichton. Robert Laffont, 2003
19. Drexler 1986 : « Engines of creation. The coming Era of Nanotechnology” par Eric Drexler Anchor Books 1986. Disponible sur le site de l’institut Foresight à l’adresse <http://www.foresight.org/EOC/>
20. Dust 2004 : Site de la société DUST inc. : <http://www.dust-inc.com/>
21. Dabezies 1980 : Dabezies (André). Faust. Encyclopedia Universalis, Copus 6, 1992 par André Dabezies
22. Digitalangel : Voir site <http://www.digitalangelcorp.com/>
23. Dupuy 2002 : (Jean-Pierre). « Pour un catastrophisme éclairé. Quand l'impossible devient certain » par Jean Pierre Dupuy . Le Seuil, 2002.
24. Dupuy 2004 : . « Pour une évaluation normative du programme nanotechnologique » par Jean Pierre Dupuy . Réalités industrielles, "Les nanotechnologies, Annales des mines, 27-32, livraison de février 2004.
25. ETC : Le site de ce mouvement est <http://www.etcgroup.org/>
26. ETC bigdown 2003 : " The bigdown". 2003. On peut télécharger ce rapport à partir du site de ETC à l’adresse <http://www.etcgroup.org/documents/TheBigDown.pdf>
27. ETC green goo 2003 : " « [Green Goo : Nanobiotechnology Comes Alive](http://www.etcgroup.org/documents/comm_greengoo77.pdf) » ", 2003. Disponible sur le site de ETC à l’adresse [http://www.etcgroup.org/documents/comm\\_greengoo77.pdf](http://www.etcgroup.org/documents/comm_greengoo77.pdf)
28. Farouki 2001 : « Les progrès de la peur » sous la direction de N. Farouki et collaborateurs. Edition le pommier, 2001.
29. Feynman 1959 : Le texte de ce discours prononcé par richard feynman en décembre 1959 est sur le site web du Caltech : <http://www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html>

30. Foresight : Le site de l'institut Foresight est <http://www.foresight.org/>
31. Freitas 2001: "Some Limits to Global Ecophagy by Biovorous Nanoreplicators, with Public Policy Recommendations" par Robert A. Freitas Disponible sur le site de l'institut Foresight à l'adresse <http://www.foresight.org/NanoRev/Ecophagy.html>
32. Goldman 2002 : Voir article de Jim Goldman "Family Set to Get Chipped" sur le site de techTV <http://www.techtv.com/news/print/0,23102,3384016,00.html>
33. Gosset 2003 : Voir article de Sherrie Gosset du 29 avril 2003 « Miami journalist gets 'chipped' » sur le site de Worldnetdaily [http://www.worldnetdaily.com/news/article.asp?ARTICLE\\_ID=32286](http://www.worldnetdaily.com/news/article.asp?ARTICLE_ID=32286)
34. Greenpeace 2003 : " Future Technologies, Today's Choices by Alexander Huw Arnall . 2003. On peut télécharger ce rapport à partir du site de Greenpeace à l'adresse <http://www.greenpeace.org.uk/MultimediaFiles/Live/FullReport/5886.pdf>
35. IBEA 2004 : Pour en savoir plus sur ces projets voir le site de cet institut <http://www.bioenergyalts.org/>
36. Jonas 1990 : Le principe responsabilité - Une éthique pour la civilisation technologique par Hans Jonas. Le Cerf, Paris, 1990 et Champs Flammarion 1998
37. Joy 2000: «Why future doesn't need us" by Bill Joy Article paru dans la revue WIRED. Numéro d'avril 2000 (<http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy.html>)
38. Jung 1971: "Psychologie et alchimie" par Carl Gustav Jung. Buchet Castel, Paris, 1971
39. Klein 2003 : « La science nous menace t elle ? » par Etienne Klein. Le Pommier, 2003.
40. Kurzweil 1999 : « The age of spiritual machines » by Ray Kurzweil. Penguin Book, 1999.
41. Lucas 2003: "We must not be blinded by science" by Caroline Lucas Le Guardian numéro du 12 juin 2003. Texte de cet article sur le site du Guardian <http://www.guardian.co.uk/nanotechnology/story/0,13839,1082665,00.html>
42. MIT 2003: Le site de ce workshop est <http://www.rfidprivacy.org/agenda.php>
43. Montemagno 2002: Haiqing Liu, Jacob J. Schmidt, George D. Bachand, Shahir S. Rizk, Loren L. Looger, Homme W. Hellinga & Carlo D. Montemagno "Control of a biomolecular motor-powered

- nanodevice with an engineered chemical switch" *Nature Materials* 1, 173-177 (2002). Résumé à l'adresse <http://www.nature.com/nsu/021028/021028-3.html>
44. Moravec 1999: « Robots. Mere machine to Transcendent Mind ». by Hans Moravec Oxford University Press, 1999.
45. Mnyusiwalla 2003 : "Mind the gap: science and ethics in nanotechnology" by Anisa Mnyusiwalla, Abdallah S Daar, Peter A. Singer *Nanotechnology* 14 (2003) R9-R13. Disponible sur le site de l'université de Toronto [www.utoronto.ca/jcb/pdf/nanotechnology\\_paper.pdf](http://www.utoronto.ca/jcb/pdf/nanotechnology_paper.pdf)
46. Oberdörster 2002: « extrapulmonary translocation of ultrafine carbon particle following whole body inhalation exposure of rats" by Günter Oberdörster et al. *Journal of toxicology and environmental health, Part A*, 65:1531-1543, 2002. Disponible sur le site de l'université du nouveau Mexique (Albuquerque) à l'adresse [epswww.unm.edu/facstaff/zsharp/rats.pdf](http://epswww.unm.edu/facstaff/zsharp/rats.pdf)
47. Oberdörster 2004: <http://www.nature.com/nsu/040105/040105-9.html>
48. Privacy right 2003: Le document « RFID Position Statement of Consumer Privacy and Civil Liberties Organizations" est disponible sur le site <http://www.privacyrights.org/ar/RFIDposition.htm>
49. RHIC 2000: Voir par exemple le site [http://nuclear.ucdavis.edu/NPG\\_rhic.html](http://nuclear.ucdavis.edu/NPG_rhic.html)
50. Rifkin 1979: "Les apprentis sorciers » par Rifkin et Ted Howard. Editions Ramsay, Paris, 1979. Jeremy
51. Secoas 2004 : Voir par exemple le site du projet Secoas au Royaume Uni. <http://www.adastral.ucl.ac.uk/sensornets/secoas/>
52. Service 2004. "Nanomaterials Show Signs of Toxicity" by Robert J. Service. *Science*, Vol 300, Issue 5617, 243 , 11 April 2003.
53. SIDNEY 2003: Voir sur le site <http://www.privacyconference2003.org>
54. Smalley 2001: "Of Chemistry, Love and Nanobots". *Scientific American* Septembre 2001 by Richard Smalley. Disponible sur le site de l'université Rice à l'adresse [http://smalley.rice.edu/rick's\\_publications/SA285-76.pdf](http://smalley.rice.edu/rick's_publications/SA285-76.pdf)
55. Smalley 2003: [Chemical & Engineering News](http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html) numéro du 01/12/2003 Volume 81, Number 48. Voir <http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>

- 56.Solusat : Voir [http://quickstart.clari.net/qs\\_se/webnews/wed/av/Bfl-applied-dig.Rsug\\_DO1.html](http://quickstart.clari.net/qs_se/webnews/wed/av/Bfl-applied-dig.Rsug_DO1.html)
- 57.Testard (Jacques) : L'oeuf transparent. Flammarion, Collection Champs, Paris, 1986
- 58.VERICHIP: Voir site <https://gvsregistry.4verichip.com/index.htm>
- 59.VERIPAY: Voir site <http://www.adsx.com/news/2003/112103.html>
- 60.Roco 2001: « Societal Implication of nanoscience and nanotechnology » by Mihail Roco and William Bainbridge. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- 61.Valade 1992 : L'idée de Progrès par Bernard Valade. Encyclopaedia Universalis, Corpus 19, 1992.
- 62.Weart 1998: "Nuclear Fear: A History of Images" Spencer by Weart Harvard University Press, 1988
- 63.Weiss 2004: « For Science, Nanotech Poses Big Unknowns" by Rick Weiss Disponible sur le site du Washington post à l'adresse <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/articles/A1487-2004Jan31.html>
64. Whitesides 2001: "The Once and Future Nanomachine Biology outmatches futurists most elaborate fantasies for molecular robots" by Georges M. Whitesides Scientific American septembre 2001. Disponible sur le site de l'Université Rice à l'adresse <http://www.ruf.rice.edu/~rau/phys600/whitesides.htm>